

Caracterização mecânica de componentes produzidos numa impressora 3D

Catarina Simão Correia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof^a. Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia

Prof. Jorge Manuel Da Conceição Rodrigues

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel Dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Jorge Manuel Da Conceição Rodrigues

Vogal(is): Prof. Inês da Fonseca Pestana Ascenso Pires

Novembro 2019

Resumo

O fabrico aditivo apresenta-se como uma tecnologia atractiva, tanto em contexto industrial como doméstico. No primeiro, por permitir o fabrico de modelos e protótipos de forma rápida e acessível, bem como pela possibilidade de fabricar estruturas celulares que, para além do seu valor estrutural, podem significar uma poupança de recursos; no segundo, por permitir o fabrico de objectos decorativos ou pequenas utilidades.

Apesar desta ser uma área recente, é alvo de grande interesse e, consequentemente, muita investigação. Ainda assim, tendo em conta a variedade de processos, parâmetros e aplicações, as possibilidades são quase infinitas, tornando-se difícil alcançar um conhecimento abrangente. Na tentativa de contribuir para esse conhecimento, esta dissertação pretende caracterizar o comportamento mecânico de estruturas impressas em PLA através de Moldação por Deposição de Filamento Fundido (Fused Deposition Modeling – FDM), em particular a região de transição elasto-plástica, considerando a influência da percentagem de enchimento e do ângulo de deposição dos filamentos. Com este objectivo, realizaram-se ensaios de tracção e compressão uniaxiais, quase-estáticos contínuos e cíclicos. Foram ainda determinadas as densidades e volumes dos provetes de compressão, permitindo comparar os valores obtidos com uma densidade de referência e, no caso dos volumes, determinar a sua variação durante o ensaio.

Os resultados permitem identificar características típicas do comportamento dos polímeros vítreos nas curvas obtidas. Permitem ainda identificar uma região não linear antes do ponto de cedência e analisar as diferenças no comportamento consoante as características do preenchimento existente.

Palavras-chave: Fabrico aditivo, caracterização mecânica, PLA, densidade, orientação

Abstract

Additive manufacturing is an attractive technology on industrial and domestic applications. On the first because it allows to build models and prototypes in a fast and accessible way, as well as for the possibility of build cellular structures that, beside its structural value, can also mean an saving of resources; on the second for allowing the fabrication of decorative objects or small utilities.

Although this is a recent subject, it is of great interest and consequently much investigation. Nevertheless, the variety of processes, parameters and applications makes the possibilities of construction almost infinite, becoming hard to accomplish a full knowledge. In an attempt to contribute to that knowledge this dissertation intends to characterize the mechanical behaviour of PLA structures printed with FDM technology, in particular the elasto-plastic transition, taking into account the infill density and the raster orientation. With that objective, there were conducted quasi-static and cyclic tests, each one of them under two types of loading: tensile and compressive. It has also been determined the densities and the volumes of the compressive specimens, allowing to compare the values obtained with a reference density and to determine the variation of volume occurred during the test.

The results allow to identify some typical characteristics of the glassy polymers behaviour on the obtained curves. They also allow to detect a non-linear region before the yielding point and analyse the differences on the mechanical behaviour depending on the characteristics of the infill.

Keywords: additive manufacturing, mechanical characterization, PLA, density, deposition angle

Agradecimentos

À FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento no âmbito do projecto MIT-Portugal “MIT-EXPL/ISF/0084/2017”.

À professora Bárbara Almeida, pelo extraordinário apoio prestado ao longo de todo este tempo.

Ao professor Jorge Rodrigues, por todo o conhecimento transmitido e todas as contribuições essenciais.

Aos meus amigos de sempre e aos que aqui fiz, que também serão para sempre, por estarem comigo no melhor e no mais difícil destes anos.

Ao Diogo, por partilharmos tanto, por estar sempre lá e por querer sempre ver-me feliz.

Aos meus pais, Carla e Luís, e à minha irmã, Joana, por absolutamente tudo.

Conteúdo

Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Conteúdo.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Acrónimos.....	xi
Nomenclatura.....	xii
1. Introdução.....	1
2. Fabrico aditivo e PLA.....	4
2.1. Processos de fabrico aditivo.....	4
2.2. Fused Deposition Modeling.....	5
2.2.1. Processo.....	6
2.2.2. Factores influenciadores do comportamento mecânico de estruturas obtidas por FDM.....	8
2.2.2.1. Parâmetros de construção.....	8
2.2.2.2. Outros factores.....	12
2.3. Polímeros.....	14
2.3.1. Definições e comportamento.....	14
2.3.2. PLA.....	18
2.4. Utilização de PLA no processo FDM.....	20
3. Métodos.....	22
3.1. Instalação/Impressora.....	22
3.2. Preparação dos provetes.....	24
3.2.1. Impressão.....	24
3.2.2. Pesagem.....	29
3.3. Ensaaios de caracterização mecânica.....	31
3.3.1. Ensaaios de compressão.....	32
3.3.2. Ensaaios de tracção.....	35
3.3.3. Ensaaios cíclicos.....	36
4. Resultados e Discussão.....	38
4.1. Dimensões e densidades.....	38

4.2. Provetes com 100% de enchimento.....	47
4.2.1. Ensaio de tracção uniaxial	48
4.2.2. Ensaio de compressão uniaxial.....	57
4.2.3. Comparação entre os resultados dos ensaios tracção e compressão uniaxiais..	62
4.3. Outras percentagens de enchimento	64
4.3.1. Ensaio de tracção uniaxial	64
4.3.2. Ensaio de compressão uniaxial.....	68
5. Conclusão e Perspectivas de Trabalho Futuro.....	75
Bibliografia	78
Anexos.....	81

Lista de Figuras

Figura 2-1 Diferentes graus de refinamento de uma aproximação por triângulos de uma superfície curva [disponível em https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/]	6
Figura 2-2 Processo FDM (adaptado de [1])	7
Figura 2-3 Diferentes direcções de construção (adaptado de [14])	8
Figura 2-4 Influência da direcção de construção na necessidade de utilização de material de suporte: (a) - material de suporte desnecessário; (b) e (c) - material de suporte necessário	8
Figura 2-5 Diferentes ângulos de deposição (adaptado de [28])	9
Figura 2-6 Influência da espessura da camada na forma de cada filamento [19]	10
Figura 2-7 Exemplos de padrões de enchimento (disponível em https://ultimaker.com/en/resources/52670-infill)	12
Figura 2-8 Padrão de curva de hilbert [21]	12
Figura 2-9 Representação esquemática de uma estrutura amorfa (adaptado de [29])	15
Figura 2-10 Curva força-deslocamento para um polímero a diferentes temperaturas [29]	16
Figura 2-11 Curva tensão-extensão característica de um polímero amorfo [33]	17
Figura 2-12 Curvas força-deslocamento e fotografias em diversos instantes da deformação [36]	18
Figura 2-13 Curva tensão-extensão verdadeira de um provete de PLA à compressão [31]	19
Figura 2-14 Curva tensão-extensão verdadeira de um provete de PLA à compressão sob tensão constante [31]	19
Figura 3-1 Impressora Ultimaker 3 Extended	22
Figura 3-2 Ilustração dos ângulos de deposição em estudo: (a) 0°; (b) 90°; (c) ±45°	24
Figura 3-3 Representação esquemática da direcção de aplicação da carga num ensaio de compressão uniaxial de um provetes impresso com ângulo de deposição de 90° (os ângulos de deposição mencionados neste trabalho têm como referência a direcção de aplicação da carga)	25
Figura 3-4 Ilustração das percentagens de enchimento: (a) 50%; (b) 75%; (c) 100%	25
Figura 3-5 Representação do efeito do ponto de início de cada camada	26
Figura 3-6 Representação esquemática da impressão de provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100%: (a) exterior do provete; (b) interior do provete; (c) provetes na mesa de impressão (com e sem camada densa no topo)	26
Figura 3-7 Representação esquemática do posicionamento dos provetes de tracção na mesa de impressão	26
Figura 3-8 Esquema de numeração dos provetes: (a) de compressão; (b) e (c) de tracção	27
Figura 3-9 Etapas de construção do raft	28
Figura 3-10 Instron 5966 utilizada nos ensaios de caracterização mecânica com acessórios para realizar os ensaios de compressão uniaxial (esquerda) e de tracção uniaxial (direita)	28
Figura 3-11 Balança de precisão Mettler Toledo ML204	29
Figura 3-12 Etapas da medição da densidade: (a) pesagem no ar; (b) pesagem no líquido; (c) pesagem no líquido com o cesto invertido	30
Figura 3-13 Medição da densidade do filamento após extrusão: (a) conjunto de filamentos usado para medição; (b) pesagem no ar; (c) pesagem no líquido	30
Figura 3-14 Representação de ensaios de relaxação de tensão (esquerda) e de fluência (direita)	31
Figura 3-15 Esquema dos provetes de compressão ensaiados	32
Figura 3-16 Disposição dos provetes de compressão na mesa de impressão	32

Figura 3-17 Ensaio de compressão com fita de teflon na interface entre o provete e os pratos compressores	33
Figura 3-18 Ilustração da correcção aplicada às curvas de compressão devido ao início não-linear: curva não corrigida (esquerda); correcção e curva corrigida (direita).....	34
Figura 3-19 Esquema dos provetes de tracção ensaiados	35
Figura 3-20 Montagem dos extensómetros	35
Figura 4-1 Representação gráfica das medidas do filamento depois de extrudido e dos provetes com 100% de enchimento de todas as orientações	42
Figura 4-2 Desvios em relação à geometria pretendida	44
Figura 4-3 Irregularidades da superfície num provete com orientação de impressão de $\pm 45^\circ$	45
Figura 4-4 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento	48
Figura 4-5 Representação gráfica da variação das propriedades nominais de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson	49
Figura 4-6 Curvas verdadeiras tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento	49
Figura 4-7 Representação gráfica da variação das propriedades verdadeiras de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson	50
Figura 4-8 Curva obtida do ensaio cíclico de um provete de tracção com 100% de enchimento e orientação de impressão de 0°	51
Figura 4-9 Comparação dos pontos máximos dos ensaios de tracção cíclicos e das curvas obtidas dos ensaios quase-estáticos dos provetes com 100% de enchimento e orientação de: (a) 0° ; (b) 90° ; (c) $\pm 45^\circ$	52
Figura 4-10 Representação da descarga puramente elástica de cada ciclo.....	52
Figura 4-11 Decomposição das componentes da extensão total de cada ciclo.....	53
Figura 4-12 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de 0° : provete nº6 (esquerda) e provete nº7 (direita).....	53
Figura 4-13 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de 0°	54
Figura 4-14 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de 90°	55
Figura 4-15 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$	55
Figura 4-16 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de 90° : provete nº6 (esquerda) e provete nº7 (direita).....	56
Figura 4-17 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$: provete nº6 (esquerda) e provete nº7 (direita).....	57
Figura 4-18 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento	58
Figura 4-19 Representação gráfica da variação das propriedades nominais de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade.....	58

Figura 4-20 Curvas verdadeiras tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento	59
Figura 4-21 Representação gráfica da variação das propriedades verdadeiras de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade.....	59
Figura 4-22 Comparação dos pontos máximos dos ensaios de compressão cíclicos e das curvas obtidas dos ensaios quase-estáticos dos provetes com 100% de enchimento e orientação de: (a) 0º; (b) 90º; (c) ±45º	60
Figura 4-23 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de 0º	61
Figura 4-24 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de 90º	61
Figura 4-25 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de ±45º	62
Figura 4-26 Representação gráfica da comparação entre os valores verdadeiros das propriedades à tracção e à compressão: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade)	63
Figura 4-27 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 75% de enchimento	64
Figura 4-28 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 50% de enchimento	65
Figura 4-29 Representação gráfica dos valores médios das propriedades à tracção de cada grupo de provetes: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson	68
Figura 4-30 Instantes de deformação não homogénea dos provetes: (a1)-(a3) provetes com 50% de enchimento; (b1)-(b3) provetes com 75% de enchimento; (c1)-(c3) provetes com 100% de enchimento	69
Figura 4-31 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento	69
Figura 4-32 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 75% de enchimento	70
Figura 4-33 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 50% de enchimento	70
Figura 4-34 Representação gráfica dos valores médios das propriedades à compressão de cada grupo de provetes: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade.....	72
Figura 4-35 Curvas nominais tensão-extensão corrigidas.....	73
Figura 4-36 Representação gráfica da variação obtida com a correcção	74

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 Denominação de cada grupo de variáveis.....	27
Tabela 4-1 Medições da densidade do filamento antes de ser extrudido	38
Tabela 4-2 Medições da densidade do filamento depois de ser extrudido	39
Tabela 4-3 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de 0º	39
Tabela 4-4 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de 90º	39
Tabela 4-5 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$	40
Tabela 4-6 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de 0º	40
Tabela 4-7 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de 90º	40
Tabela 4-8 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$	41
Tabela 4-9 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de 0º.....	41
Tabela 4-10 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de 90º.....	41
Tabela 4-11 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$	42
Tabela 4-12 Densidades relativas dos provetes em relação ao valor de referência para cada orientação	43
Tabela 4-13 Volume de cada um dos provetes de compressão.....	43
Tabela 4-14 Análise da variação de volume dos provetes de compressão.....	46
Tabela 4-15 Comparação dos valores de médios tensão máxima de cada grupo de provetes	66
Tabela 4-16 Comparação dos valores médios de extensão no ponto de tensão máxima de cada grupo de provetes.....	66
Tabela 4-17 Comparação dos valores médios de tensão de fractura de cada grupo de provetes	66
Tabela 4-18 Comparação dos valores médios de extensão na fractura de cada grupo de provetes ...	67
Tabela 4-19 Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade de cada grupo de provetes	67
Tabela 4-20 Comparação dos valores médios do coeficiente de Poisson de cada grupo de provetes	67
Tabela 4-21 Comparação dos valores médios de tensão máxima de cada grupo de provetes	71
Tabela 4-22 Comparação dos valores médios de extensão no ponto de tensão máxima de cada grupo de provetes.....	71
Tabela 4-23 Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade de cada grupo de provetes	72

Lista de Acrónimos

ASTM - American Society for Testing Materials

FDM - Fused Deposition Modeling

CAD - Computer-Aided Design

CAM - Computer-Aided Manufacturing

CNC - Computer Numerical Control

STL - Standard Triangulation Language ou Standard Tessellation Language

ABS - Acrylonitrile butadiene styrene

PLA - Poly Lactic Acid

Nomenclatura

A_0 – área inicial

e – extensão nominal

E – módulo de elasticidade

F - força

l – comprimento

l_0 – comprimento inicial

P_A – peso no ar

P_B – Peso na água

S – tensão nominal

α - factor de correcção do peso

v - velocidade

ε – extensão verdadeira

$\dot{\varepsilon}$ – velocidade de deformação

ν – coeficiente de Poisson

ρ – densidade

ρ_L – densidade do líquido

ρ_0 – densidade do ar

σ – tensão verdadeira

1. Introdução

O fabrico aditivo (também referido como impressão 3D [1, 2]) apresenta-se como um método de fabrico em que as geometrias pretendidas vão sendo construídas através da adição progressiva de camadas de material, contrastando com as técnicas de fabrico substractivo em que o material vai sendo consecutivamente retirado de um bloco inicial até que a geometria final pretendida seja obtida. Esta metodologia permite que sejam fabricadas peças a partir de um modelo tridimensional desenhado num computador, possibilitando desta forma a obtenção de peças com geometria complexa, algumas delas que muito dificilmente poderiam ser obtidas através das técnicas de fabrico substractivo. Compreende-se assim que para que as técnicas de fabrico aditivo se tornassem possíveis tenha sido previamente necessário o desenvolvimento de tecnologias complementares, nomeadamente o desenho assistido por computador *computer-aided design* - CAD), o fabrico assistido por computador (*computer-aided manufacturing* - CAM) e o controlo numérico (*computer numerical control* - CNC) [3]. Esta forma de fabrico oferece uma grande flexibilidade de design e é muito vantajosa face aos restantes métodos em casos onde se pretende fabricar produtos personalizados e em pequenos lotes, uma vez que não tem associado o desenvolvimento de moldes para o fabrico. Estes factos contribuem, por exemplo, para uma redução do tempo de desenvolvimento de um produto, uma vez que torna possível o fabrico mais rápido e económico de diversos protótipos. Os vários processos englobados no grupo do fabrico aditivo possibilitam a produção de objectos numa ampla gama de tamanhos. A precisão e o acabamento superficial obtidos variam consoante o processo utilizado, e podem também ser bastante influenciados pelos parâmetros definidos para esse mesmo processo. Apesar de ser possível a escolha entre metais, polímeros, cerâmicos e betão, esta é uma área onde continuarão a ser desenvolvidos esforços, por forma a descobrir novos materiais ou novas e melhoradas formas de utilizar os processos de fabrico aditivo com os materiais já existentes [2]. As peças produzidas recorrendo à impressão 3D podem por vezes apresentar características mecânicas inferiores às produzidas por outros métodos de fabrico, bem como comportamento anisotrópico. Estes factos podem constituir um entrave à aplicação dos processos de fabrico aditivo em determinadas situações [2].

O recurso a partes produzidas por fabrico aditivo verifica-se em áreas distintas e bastante relevantes, como é o caso da indústria automóvel, aeroespacial, aplicações biomédicas e, mais recentemente, na construção civil [2]. Na indústria aeronáutica e aeroespacial é fundamental tentar obter rácios peso/resistência cada vez menores, isto é, ter partes resistentes que sejam o mais leves possível. Os processos de fabrico aditivo contribuem fortemente para o cumprimento deste objectivo, não só pela possibilidade de criação geometrias complexas (ex.: *honeycomb cell* [3]), como pela possibilidade de utilização de materiais que podem ser difíceis de processar por outros meios. Estes materiais estão também geralmente associados a elevados custos e, sendo o desperdício de material muito superior no caso de fabrico substractivo, o fabrico aditivo apresenta-se vantajoso também neste aspecto.

O fabrico aditivo tem sido utilizado na indústria automóvel para reduzir o tempo de desenvolvimento de um novo produto (através da criação rápida de modelos e protótipos e da redução dos seus custos), mas também para o fabrico (em pequenos lotes) de peças funcionais para aplicação em veículos com

pequeno volume de produção, como é o caso de veículos de luxo ou de competição [4]. Um outro exemplo interessante surge na fábrica Volkswagen Autoeuropa, onde são fabricados protótipos que auxiliam a montagem dos veículos ao longo de uma linha de produção. Neste caso, os protótipos são desenhados e produzidos na própria fábrica através do processo de Modelação por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* – FDM) e surgem como complementos para ferramentas ou como acessórios que facilitam a correcta e rápida colocação de determinados componentes no veículo [5].

Mais recentemente, estas técnicas começaram também a ser aplicadas ao sector da construção. O seu interesse prende-se não só pela possibilidade de revolucionar esta indústria, mas também com a hipótese de facilitar a construção de estruturas na lua. Foi em 2014, em Amesterdão, que surgiu a primeira habitação construída aplicando estes métodos, neste caso em particular, o processo de FDM. No mesmo ano, uma empresa de construção na China construiu, em menos de um dia, um grupo de habitações. Em geral, são utilizados e combinados materiais como cimento, areia, pó de rocha e termoplásticos [2].

A possibilidade de construir geometrias complexas e altamente personalizáveis é uma vantagem da utilização deste tipo de fabrico em aplicações biomédicas. O fabrico aditivo torna possível a construção de implantes e próteses adaptadas a cada paciente, para além de permitir controlar a estrutura interna e a porosidade, o que ajuda não só a prever as características mecânicas do objecto em questão, como também a promover a reconstrução do osso e dos tecidos. [2, 3]. A utilização do fabrico aditivo estende-se à construção dos próprios tecidos: células são adicionadas aos biomateriais comumente utilizados para originar as denominadas “*bio-inks*”. A impressão com *bio-inks* acarreta cuidados e limitações para que as células não sejam danificadas. Um dos desafios enfrentados actualmente nesta área centra-se na construção de órgãos. Os órgãos carecem da existência de vasos sanguíneos para assegurar o seu metabolismo e, assim sendo, para que se torne possível a impressão de órgãos, será primeiramente necessário conseguir criar redes complexas de vasos sanguíneos. [2].

A primeira forma de fabrico aditivo, denominada Estereolitografia (*Stereolithography*), surgiu na década de 80. Inicialmente, o objectivo principal era a criação de modelos e protótipos. No entanto, a investigação e desenvolvimento verificados desde então têm feito com que o foco do fabrico aditivo abranja também a produção de peças para uso final nas suas aplicações [2, 3]. Assim, torna-se de extrema importância compreender de forma profunda o processo que for aplicado e a influência das suas variáveis, para que seja possível prever, tanto quanto possível, as características finais da peça produzida.

Esta dissertação foca-se no processo FDM e tem como objectivo contribuir para um aprofundamento do conhecimento acerca do comportamento mecânico das estruturas de PLA obtidas através deste. Ainda que usualmente as aplicações de objectos produzidos por FDM não sejam estruturais e, por isso, não estejam sujeitas a condições de carregamento além do domínio elástico, para obter uma caracterização mecânica completa importa tentar caracterizar a transição elasto-plástica deste tipo de estrutura. É também relevante analisar as diferenças no comportamento de estruturas com diferentes preenchimentos face ao comportamento de estruturas densas.

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro esta introdução, na qual é feita uma primeira abordagem ao fabrico aditivo e às motivações para o estudo desta temática.

No segundo capítulo apresentam-se vários processos de fabrico aditivo, sendo feita uma análise mais detalhada ao processo FDM, incluindo os seus parâmetros e a influência que estes têm nas peças produzidas. Neste capítulo encontra-se ainda informação referente aos polímeros, incluindo algumas definições e descrições do seu comportamento mecânico, sendo feita uma análise particular ao polímero utilizado neste trabalho.

O terceiro capítulo expõe as diversas etapas realizadas ao longo do trabalho experimental, descrevendo com algum detalhe os procedimentos e metodologias seguidos.

No quarto capítulo encontram-se os resultados obtidos nos procedimentos realizados, bem como uma discussão dos mesmos.

Por último, é feita uma síntese do trabalho experimental realizado e são apresentadas as principais conclusões e propostas de trabalho de desenvolvimento nesta área.

2. Fabrico aditivo e PLA

Os processos de fabrico aditivo caracterizam-se por produzir objectos adicionando material, ao invés de o retirarem (fabrico substractivo). Apesar de todos assentarem neste princípio, os processos de fabrico aditivo são muito diversificados, variando nos materiais que utilizam e nas dimensões para as quais são mais apropriados, por exemplo.

2.1. Processos de fabrico aditivo

A Estereolitografia (*Stereolithography* - STL) foi a primeira técnica de fabrico aditivo, desenvolvida em 1986 pela empresa *3D Systems, Inc.* Este processo utiliza luz ultravioleta para solidificar resina fotossensível que se encontra inicialmente no estado líquido. Depois de o padrão de cada camada ser solidificado, a plataforma que se encontra dentro do reservatório de resina desce uma quantidade previamente estabelecida e correspondente à espessura da camada. O processo repete-se em cada camada até que a geometria final pretendida seja obtida [1-3]. A peça construída pode ser constituída por diferentes materiais. Para tal, o material que está a ser utilizado inicialmente deve ser retirado e o reservatório volta a ser cheio com o material que se pretende utilizar de seguida [3]. Para além de partes com vários materiais, este processo permite também a inclusão de partículas sólidas (por exemplo, de cerâmicos) para o fabrico de compósitos [2]. Este processo permite o fabrico de peças com elevada precisão, no entanto, é bastante dispendioso [1, 2].

De forma semelhante ao anterior, o método Processamento de Luz Digital (*Digital Light Processing* - DLP) solidifica progressivamente camadas de resina. No entanto, ao contrário do primeiro, a solidificação ocorre em toda a camada em simultâneo (uma vez que a luz é projectada já com o padrão bidimensional previamente definido para cada camada), em vez de ser progressivamente solidificada através da passagem de um feixe laser localizado. O processo DLP oferece menor resolução que a Estereolitografia [1].

Nos processos classificados como Fusão em cama de pó (Powder Bed Fusion - PBF), onde se incluem, por exemplo, Sinterização Selectiva por Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS), Fusão Selectiva por Laser (*Selective Laser Melting* - SLM) e Impressão Tridimensional (*Three-Dimensional Printing* - 3DP), os objectos são contruídos a partir de material em forma de pó. Depois de as partículas inicialmente soltas serem unidas, a cama de pó na câmara de impressão desce uma quantidade previamente estabelecida que corresponde à espessura da camada e uma nova camada de partículas soltas provenientes de um reservatório é depositada. Este procedimento é repetido até a peça estar completa. Estes processos diferem entre si na forma como as partículas são unidas. Nos processos SLS e de SLM é utilizado um feixe laser que funciona como fonte de calor e actuam em zonas específicas de cada camada. No primeiro caso, a elevada temperatura local induzida pelo laser à superfície das partículas faz com que estas se fundam a nível molecular (*sintering*); já no segundo caso, as partículas são completamente fundidas (*melting*), o que conduz a uma peça mais densa e com melhores propriedades mecânicas [1-4]. A qualidade da peça final é influenciada por factores como tamanho das partículas, potência do laser e velocidade de *scanning* (isto é, a velocidade a que o feixe

vai percorrendo a camada) [1]. No caso de 3DP, as partículas são unidas com recurso a um líquido aglomerante. As peças produzidas por 3DP têm maior porosidade do que as produzidas através dos dois métodos descritos anteriormente, no entanto, este processo apresenta vantagens ao nível dos materiais passíveis de serem utilizados: o SLM está limitado a metais e ligas metálicas, em SLS podem ser utilizados metais, cerâmicos e polímeros; o processo 3DP permite a utilização de materiais de entre uma gama mais lata (podendo ser utilizada qualquer combinação de materiais em pó) [1, 2, 4]. A qualidade final das peças impressas é determinada por factores como o tamanho e forma das partículas, características do aglomerante, a sua velocidade de deposição e sua interacção com as partículas [1, 2]. Uma das grandes vantagens dos processos de PBF é não serem necessárias estruturas de suporte adicionais para fabricar determinadas geometrias, uma vez que a própria cama de pó (mesmo em zonas não solidificadas) serve este propósito. [1, 2].

O método Deposição Directa de Energia (*Direct Energy Deposition*), também conhecido como *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) ou *Laser Metal Deposition* (LMD), a fonte de energia e o material de adição são aplicados em simultâneo, numa região específica. Isto faz com que o material seja fundido imediatamente antes da sua deposição na localização pretendida [2, 3]. Este processo assemelha-se assim aos processos de SLM, com a diferença de que neste caso não existe uma cama de pó, visto que este é aplicado directamente. O processo permite a utilização de uma grande variedade de metais e pode ser utilizado para reparação de peças que dificilmente seriam reparadas de outra forma [2, 3]. É possível a sua aplicação a peças de grandes dimensões, apesar de garantir uma menor precisão, pior acabamento superficial e o fabrico de peças menos complexas comparativamente com SLM [2].

O processo *Contour Crafting* é o mais utilizado na construção de grandes edifícios. Recorre a bicos de extrusão (*nozzles*) de grandes dimensões e a pressões elevadas para ser capaz de extrudir grandes quantidades de betão ou de material do solo [2]. Um dos grandes atractivos desta tecnologia é a possibilidade de ser utilizada em ambientes espaciais.

O processo Manufatura de Objectos Laminados (*Laminated Object Manufacturing* - LOM) inclui características de fabrico aditivo e de fabrico substractivo. As camadas são formadas a partir de chapas, ligadas através da aplicação de pressão e calor [1-4]. As chapas são unidas e o contorno de cada camada vai sendo recortado. Alternativamente, as chapas podem ser recortadas antes de serem unidas, o que se torna vantajoso no caso de se pretender fabricar de peças com cavidades interiores complexas [2]. A remoção do material excedente é uma etapa morosa que se realiza apenas depois de toda a peça ser contruída, funcionando este excedente durante o processo de fabrico como material de suporte [1-3]. O método LOM pode ser aplicado em materiais como papel, cerâmicos, compósitos, polímeros e metal, no entanto não permite atingir precisões e acabamentos superficiais tão elevados como outros processos (processos PBF, por exemplo) [2-4].

2.2. Fused Deposition Modeling

Scott Crump, um dos fundadores da *Stratasys*, patenteou, em 1989, o processo de Modelação por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* – FDM) [1]. Este processo, também

conhecido como Fabricação por Filamento Fundido (*Fused Filament Fabrication* - FFF), é amplamente utilizado, sendo este o processo empregue comumente nas impressoras 3D de secretária. Relativamente ao universo dos processos de fabrico aditivo, inclui-se na categoria “extrusão de material”, da qual fazem parte os processos cujo material é selectivamente depositado através de um bico ou orifício [6].

2.2.1. Processo

O funcionamento básico deste método consiste na fusão de um filamento de polímero termoplástico que vai sendo depositado numa plataforma. Comparativamente a outros métodos de fabrico aditivo, o FDM apresenta-se como um processo de baixo custo e capaz de elevadas velocidades de impressão. No entanto, no caso de geometrias complexas, pode ser necessário recorrer a estruturas de suporte e, apesar dos desenvolvimentos verificados nesta área, os materiais passíveis de serem utilizados continuam a ser relativamente limitados [1,2]. *Fernandez et al.* determinaram os limites máximos de pontes, “abas” e ângulos passíveis de serem construídos sem ser necessário recorrer a material de suporte [7].

Em comparação, o processo de moldação por injeção origina peças mais isotrópicas do que o processo de FDM. Um estudo realizado por *Ahn et al.* concluiu que a tensão máxima à tracção de provetes impressos (com espaçamento zero entre os filamentos) variava entre 10% e 73% da tensão máxima dos provetes injectados, conforme o ângulo de deposição dos filamentos. No caso das tensões de compressão dos provetes impressos, variavam entre 80% a 90% das tensões dos provetes injectados [8].

Tal como no caso dos restantes métodos de fabrico aditivo, o processo inicia-se com a modelação tridimensional da peça que se pretende fabricar, podendo esta ser obtida com recurso a um software de CAD ou, em casos em que se pretende reproduzir geometrias já existentes, a tecnologias de scan. A geometria que se pretende construir é transmitida à máquina, em geral, através de um ficheiro de formato STL, no qual se recorre a um conjunto de triângulos para obter uma aproximação da superfície do modelo tridimensional (figura 2-1). O surgimento deste formato coincide com o desenvolvimento do processo de *Stereolithography*, podendo por isso ser visto como uma referência ao mesmo (STereoLithography). Por vezes, é também referido como sendo uma abreviatura de *Standard Triangulation Language* ou *Standard Tessellation Language*. [6].

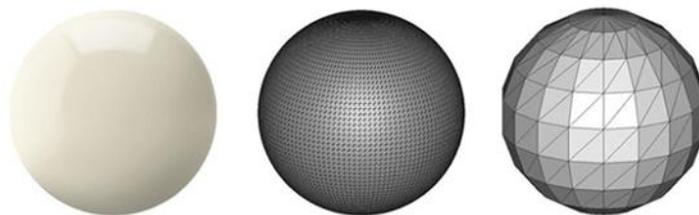


Figura 2-1 Diferentes graus de refinamento de uma aproximação por triângulos de uma superfície curva [disponível em <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>]

O ficheiro em formato STL é então enviado para um software cuja função é “fatiar” a peça, isto é, definir os parâmetros e características que permitirão construí-la camada a camada. Estes *licer softwares* podem ser específicos para uma impressora (como é o caso do MakerBot Print, dedicado exclusivamente às impressoras do fabricante MakerBot) e pagos (por exemplo, o Simplify3D), no entanto, existe uma grande oferta de softwares de livre acesso e com a possibilidade de serem adaptados a diferentes impressoras, como é o caso do Slic3r e do Cura, este último desenvolvido pelo fabricante Ultimaker.

Depois de definidos todos os parâmetros, o software gera um ficheiro contendo o código G que será fornecido à máquina. O código G, específico para cada máquina, é a linguagem utilizada para transmitir quais os movimentos necessários e também a forma como estes devem ser executados [9]. Para além das informações relativas às deslocações necessárias, pode, ou não, ser necessário incluir informações relativas ao material [10].

As impressoras são, regra geral, constituídas por uma cabeça de impressão e uma plataforma de impressão sobre a qual a peça vai sendo construída (Figura 2-2). A cabeça de impressão engloba uma unidade de aquecimento onde o filamento inicial é fundido, e, conforme as impressoras, um ou dois bicos de extrusão (*nozzles*). A utilização de múltiplos bicos de extrusão facilita a impressão de peças com várias cores e/ou com vários materiais (podendo tratar-se de material de suporte ou não). A cabeça de impressão desloca-se ao longo de duas direcções num plano horizontal, depositando o filamento fundido de acordo com as informações provenientes do ficheiro originado pelo *licer software*. Após a conclusão de cada camada, a plataforma e a cabeça de impressão afastam-se uma distância correspondente à espessura da camada, valor este também previamente definido no ficheiro recebido pela impressora [11, 12].

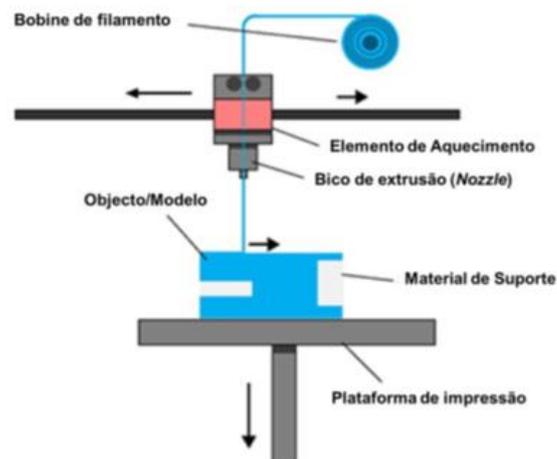


Figura 2-2 Processo FDM (adaptado de [1])

2.2.2. Factores influenciadores do comportamento mecânico de estruturas obtidas por FDM

2.2.2.1. Parâmetros de construção

Os parâmetros de impressão definidos no início do processo afectam não só as propriedades mecânicas, mas também a qualidade superficial e a precisão dimensional da peça obtida [13].

Estes parâmetros incluem variáveis geométricas (como por exemplo, a espessura da camada, a percentagem e padrão de enchimento, entre outros) e variáveis do processo (como por exemplo, a temperatura de extrusão).

Apresentam-se de seguida alguns dos parâmetros que mais comumente são alterados/ajustados nos objectos impressos.

A direcção de construção pode ser definida como a direcção segundo a qual as camadas vão sendo progressivamente adicionadas (Figura 2-3). Este parâmetro tem influência na tensão máxima e no tipo de fractura. Quando a direcção de construção coincide com a direcção de aplicação da força de tracção, as camadas serão perpendiculares a esta direcção. Como a força de ligação entre camadas é inferior à resistência do próprio filamento, esta orientação terá como consequência uma menor resistência do objecto final. Da mesma forma, camadas paralelas à direcção de aplicação da força conferem maior resistência [13-16]. No caso de forças compressivas, pode considerar-se que a tensão máxima não é muito afectada pela direcção [8]. A direcção de construção pode também, em determinadas geometrias, ditar a necessidade de recorrer a material de suporte durante o fabrico (figura 2-4).

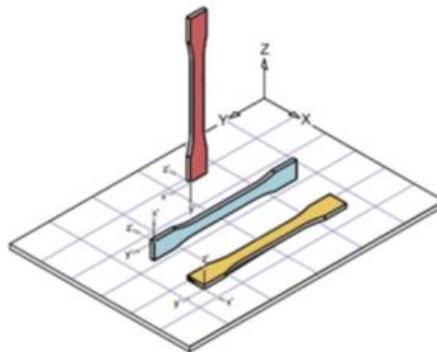


Figura 2-3 Diferentes direcções de construção (adaptado de [14])

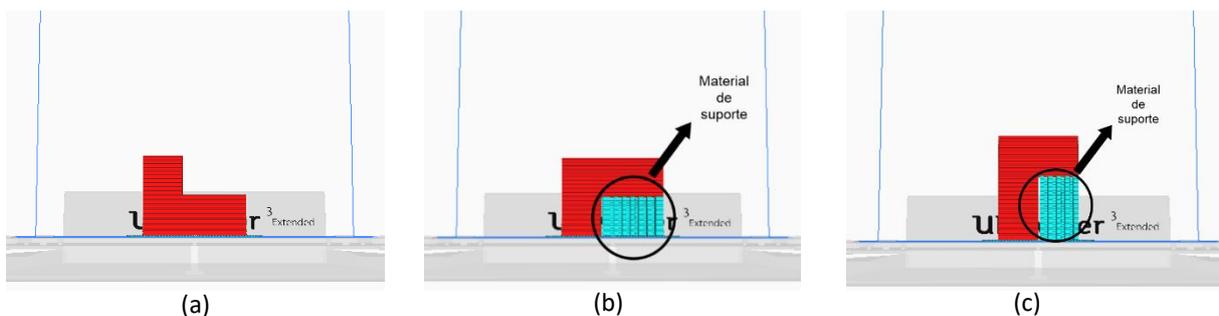


Figura 2-4 Influência da direcção de construção na necessidade de utilização de material de suporte: (a) - material de suporte desnecessário; (b) e (c) - material de suporte necessário

Define-se ângulo de deposição como sendo o ângulo formado, em cada camada, entre a direcção de deposição do filamento e uma direcção de referência (Figura 2-5). Estudos revelam que em caso de provetes unidireccionais (isto é, em que todas as camadas são construídas com o mesmo ângulo de deposição e mantendo a mesma direcção de construção) este parâmetro segue uma tendência semelhante ao da direcção de construção, isto é, a resistência é maior quando as fibras estão alinhadas com a direcção da força aplicada e vai diminuindo à medida que o ângulo entre as fibras e a direcção da força tende para 90° [8,17]. O mesmo se pode verificar em [18], onde é a medida a tensão no plano paralelo à direcção da força, e se conclui que a maior resistência se obtém com provetes cujas camadas são contruídas com filamentos a 45° .

Estes dois parâmetros têm ainda influência no tipo de fractura observado nestas estruturas. A observação da fractura de provetes ensaiados à tracção revelou que esta ocorre num plano perpendicular à direcção de aplicação da força, excepto no caso de provetes que são construídos com camadas cuja orientação dos filamentos alterna entre 45° e -45° , onde se verificou que a fractura ocorreu num plano a 45° da direcção de aplicação da força [8,26]. Para além da orientação dos filamentos, também a direcção de construção dos provetes afecta o seu tipo de fractura, variando entre fractura frágil (no caso de camadas perpendiculares à força aplicada) e dúcteis [14]. Devido à natureza dos processos, a superfície de fractura de provetes produzidos por moldação por injecção é mais suave do que de um provete produzido por FDM [18].

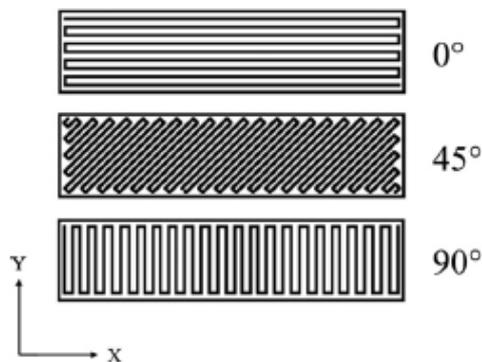


Figura 2-5 Diferentes ângulos de deposição (adaptado de [28])

A espessura da camada corresponde à altura de cada uma das camadas que vão sendo progressivamente depositadas para formar o objecto. A influência deste parâmetro nas propriedades mecânicas das peças tem sido difícil de qualificar uma vez que têm sido realizados estudos cujos resultados são contraditórios. Vários estudos afirmam que uma redução da espessura da camada conduz a uma melhoria do comportamento no que diz respeito à tensão máxima [19,20]. Em [21], apesar de a espessura da camada não ter sido objecto de estudo, apresenta-se uma justificação para o facto de os valores mais baixos desta estarem associados a tensões máximas mais elevadas: quando o valor da altura da camada iguala o valor do diâmetro do *nozzle*, a secção de cada filamento depositado tem aproximadamente a forma de um círculo; à medida que este valor vai sendo reduzido, a forma da secção passa a assemelhar-se com um rectângulo, o que faz com que a dimensão dos poros entre filamentos sejam menores e, conseqüentemente, a peça seja mais resistente (figura 2-6).

Uma justificação semelhante é apresentada em [19], onde, para além de ter sido avaliada a influência da espessura da camada considerando diâmetros do bico de extrusão constantes, também foi avaliado o rácio entre o diâmetro do bico de extrusão e a espessura da camada. Conclui-se, através de ensaios de flexão, que a força de ligação dos filamentos é influenciada por este rácio, correspondendo um aumento deste (ou seja, filamentos com secção aproximadamente rectangular) a um aumento da tensão máxima. Conclui-se também que este rácio permite prever qual será o tipo de fractura apresentada pelos provetes [19]. No entanto, verificam-se também casos em que o aumento da espessura da camada promoveu um aumento da tensão máxima, sugerindo que quanto menos camadas forem necessárias, menor será o número de ligações entre filamentos (mais fracas do que o material) e mais resistente será a peça [13,14]. A espessura da camada apresenta-se também como um factor determinante no que toca ao tempo de impressão: quanto maior for a espessura, menos camadas serão necessárias para construir a peça, logo, menor será o tempo de impressão (o que pode ainda significar uma redução dos custos) [14]. Este parâmetro tem ainda influência na superfície final do componente e na sua precisão dimensional. Espessuras de camada pequenas tendem a conduzir a menores erros dimensionais, sendo também um factor importante que esta seja um múltiplo da dimensão total que se pretende obter [13].

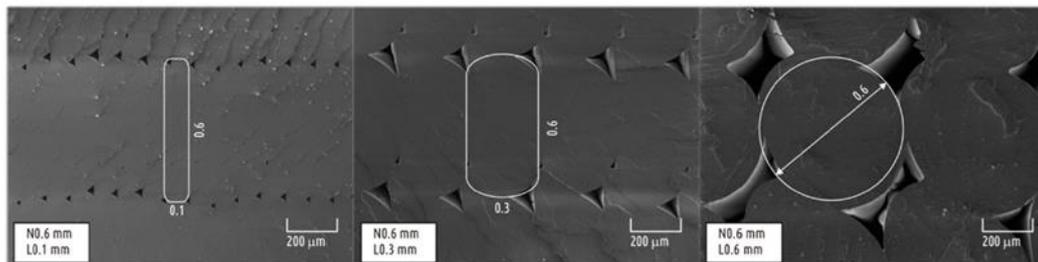


Figura 2-6 Influência da espessura da camada na forma de cada filamento [19]

A temperatura a que o filamento é extrudido também influencia significativamente as propriedades mecânicas obtidas. Um aumento da temperatura conduz a uma melhor fusão entre os filamentos (na própria camada e entre camadas) e a uma diminuição do tamanho das porosidades, o que leva, consequentemente, a um aumento da tensão máxima [13, 22].

A percentagem de enchimento e as propriedades mecânicas finais apresentam uma correlação positiva uma vez que uma maior percentagem de enchimento corresponde a mais material existente para resistir [13, 20].

Pode também ser possível definir uma distância entre filamentos. Este valor é normalmente influenciado pelo valor atribuído à percentagem de enchimento, mas pode em alguns casos ser definido pelo utilizador. A sua influência é semelhante à da percentagem de enchimento, uma vez que menores intervalos conduzem a peças mais densas e mais resistentes. Pode ser possível a utilização de “distâncias negativas” entre filamentos, isto é, impor que os filamentos se sobreponham, originando peças ainda mais densas. No entanto, devem ser estabelecidos limites mínimos para esta distância, uma vez que material em excesso no bico de extrusão e na própria peça podem dar origem a más geometrias finais [8].

Outra das características que deve ser definida é o padrão segundo o qual o filamento é depositado em cada camada (figura 2-7). Um estudo realizado tentou concluir acerca da influência desta variável,

no entanto, as suas conclusões não corroboraram as referências anteriores, que afirmavam que as propriedades mecânicas das peças são influenciadas pelo padrão de enchimento. A pouca influência desta variável verificada neste estudo pode ser justificada com o facto de a percentagem de enchimento ter sido definida como máxima em todos os casos, sugerindo que o efeito do padrão será mais óbvio se forem considerados provetes de maiores dimensões e com menores percentagens de enchimento [13].

Uma das grandes vantagens do fabrico aditivo é a possibilidade de obter materiais celulares. Em [23] estudou-se a influência de diferentes tipos de padrão, bem como do número de contornos exteriores utilizados. Concluiu-se que a utilização de mais contornos conduz a um aumento das tensões máximas de tracção e de flexão, e que a utilização de apenas um contorno evidencia o comportamento do padrão de enchimento do interior. Foram também encontradas relações semelhantes às já existentes na bibliografia para materiais celulares, que permitem prever aproximadamente as propriedades finais de um componente com interior celular com base nas propriedades do componente denso e na relação entre as suas densidades.

Em [21] apresenta-se uma análise da influência exercida pelo preenchimento de uma peça de PLA nas suas propriedades mecânicas (à tracção e à flexão) finais. A influência do preenchimento abrange vários efeitos em simultâneo: o da temperatura a que o material é depositado, a percentagem de enchimento e o padrão escolhido. A qualidade da ligação entre filamentos e entre camadas, bem como a dimensão e quantidade de poros existentes, são apresentados como dois factores determinantes para as propriedades finais obtidas e, por isso, é com referência a esses que se realiza a análise neste estudo. Foram avaliados quatro padrões de enchimento (concêntrico, linear com camadas alternadas a $+45^\circ$ e -45° , hexagonal (*honeycomb*) e curva de hilbert) e três densidades de enchimento (20%, 50% e 100%). Concluiu-se que, para todas as densidades, o padrão concêntrico apresentava as maiores tensões e os maiores módulos, tanto à tracção como à flexão. Verificou-se também que, no caso do padrão da curva de hilbert (figura 2-8), as propriedades avaliadas melhoravam significativamente quando a percentagem de enchimento era 100%, mostrando neste caso uma resistência semelhante à do padrão concêntrico. Isto é justificado com o facto de, para as percentagens de 20% e 50%, a orientação de deposição dos filamentos e a força de ligação entre as camadas serem os factores mais determinantes das propriedades finais obtidas; quando a densidade é 100%, a força de ligação entre os filamentos passa também a ser relevante. Assim percebe-se o comportamento gerado pelo padrão da curva de hilbert: quando as percentagens de enchimento são baixas, a orientação de deposição dos filamentos não coincide com a das cargas aplicadas e, por isso, conduz ao pior desempenho de entre todos os padrões avaliados; quando as peças passam a ser densas, a força de ligação entre os filamentos é a maior, uma vez que o percurso que o bico de extrusão tem de percorrer entre cada filamento depositado é o menor de entre todos os padrões avaliados. Isto é evidenciado por fotografias

da microestrutura das superfícies de fractura dos provetes, que mostram que o padrão da curva de hilbert apresenta menos poros e de menores dimensões.

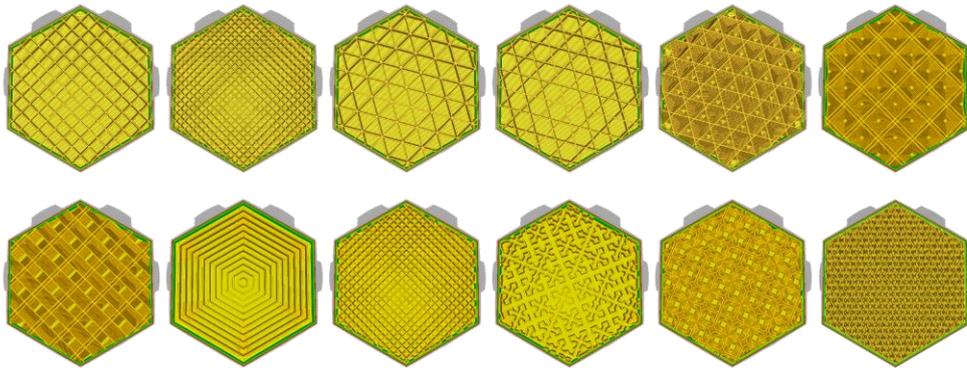


Figura 2-7 Exemplos de padrões de enchimento (disponível em <https://ultimaker.com/en/resources/52670-infill>)

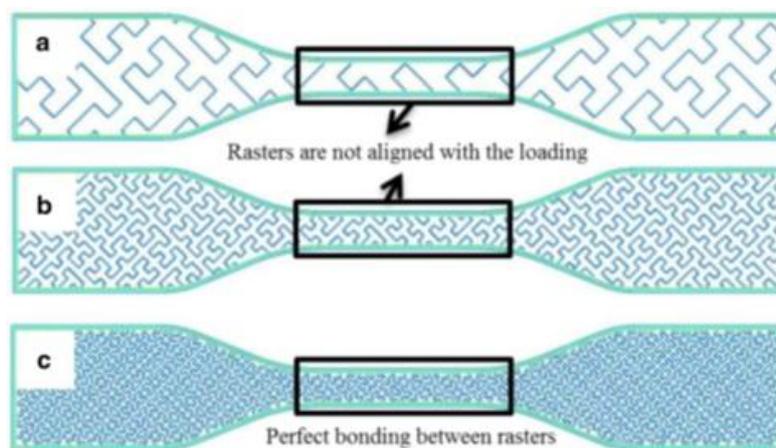


Figura 2-8 Padrão de curva de hilbert [21]

2.2.2.2. Outros factores

Visto que as aplicações deste método abrangem o fabrico de peças para uso final, têm vindo a ser desenvolvidas técnicas auxiliares com o objectivo de melhorar as suas propriedades mecânicas. Estas técnicas podem passar por uma optimização dos parâmetros de impressão, pelo recurso a tratamentos térmicos posteriores à impressão e/ou pela utilização de filamentos reforçados com fibras.

Interessa também saber a priori se algumas variáveis existentes ao longo do processo (como por exemplo, a cor do filamento ou a humidade do ambiente) terão consequências nas propriedades finais dos componentes para que, se for caso disso, possam ser tidas em conta. Quanto mais profundo for o conhecimento acerca do processo, das suas características comparativamente a outros métodos, e da influência de todas as variáveis envolvidas, mais facilmente se conseguirá prever as características da peça final. Nos tópicos que se seguem apresentam-se alguns resultados obtidos a este respeito, fruto de estudo anteriores.

- Utilização de filamentos reforçados

Em [24] apresentam uma revisão dos estudos realizados acerca da utilização de filamentos reforçados com fibras no processo FDM. São analisados os resultados obtidos em trabalhos anteriores e a partir destes são retiradas algumas conclusões gerais. Verificou-se que as fibras descontínuas tendem a alinhar-se com a orientação de deposição dos filamentos, o que justifica que as propriedades mecânicas mais elevadas se tenham registado nos casos em que a força foi aplicada nos provetes paralelamente à orientação de deposição dos filamentos. Ainda assim, as propriedades mecânicas deste tipo de material ainda não são comparáveis às propriedades verificadas nas ligas de alumínio (utilizadas, por exemplo, na indústria aeronáutica). O ensaio de provetes com a força aplicada perpendicularmente à orientação de deposição dos filamentos revelou uma diminuição considerável das propriedades mecânicas relativamente ao caso exposto anteriormente. Os resultados obtidos neste caso são semelhantes aos obtidos no caso dos filamentos originais (isto é, sem fibras). Este facto leva a concluir que o material não é determinante no que toca à resistência na direcção perpendicular à direcção de deposição, sendo o factor mais relevante neste caso a força de ligação entre os filamentos, sendo esta influenciada pelos parâmetros de impressão.

- Influência das cores

Os filamentos comercializados variam não só no material de que são constituídos, mas também na sua cor. Assim, a cor passa a ser um dos parâmetros variáveis no fabrico de uma peça e torna-se revelante perceber se tem influência nas propriedades mecânicas finais.

Em [22] foi estudada a influência das cores nas propriedades mecânicas de provetes de PLA. Todos os filamentos (branco, preto, azul, cinzento e “natural”) pertenciam ao mesmo comerciante e os provetes foram impressos na mesma impressora e com os mesmos parâmetros de impressão. Concluiu-se que diferentes cores apresentam diferentes percentagens de cristalinidade, bem como diferentes valores das tensões de cedência, tensões máximas e extensão máxima. Os valores mais elevados destas propriedades foram obtidos nos testes com o filamento “natural”, sendo também este o que apresenta menores valores de cristalinidade.

Em [19] foram ensaiados filamentos de PLA de diferentes cores e de diferentes fabricantes. Os filamentos incolores (de ambos os fabricantes) apresentaram os valores mais elevados de tensão máxima, sugerindo que os pigmentos adicionados reduzem de alguma forma a resistência da peça impressa.

A conclusão de que a cor do filamento pode ter influência nas propriedades mecânicas é verdadeira para outros materiais que não o PLA, tal como verificado em [25].

- Absorção de humidade

Em [26] foi estudado o efeito da absorção de humidade nas propriedades mecânicas das peças. Para tal, provetes produzidos por FDM e por moldação por injeção foram imersos em água destilada fazendo variar a duração da imersão e a temperatura da água. Pôde assim concluir-se que os provetes imersos em água a temperatura elevada têm uma maior taxa de absorção mas que, no entanto, o volume total absorvido não varia. Foi também observado que a taxa de absorção é mais elevada nos provetes produzidos por FDM (o que pode ser justificado pela maior presença de poros, em consequência da natureza do processo). Os ensaios mecânicos realizados mostraram que a extensão,

o módulo de elasticidade e a tensão máxima dos provetes diminuem com o aumento da absorção de humidade.

- Influência da extrusão

Estudos anteriores realizados com PLA e ABS revelaram que o processo de extrusão tem pouca influência nas propriedades mecânicas do próprio filamento. Verificou-se que a tensão máxima suportada pelos filamentos de PLA era superior à tensão suportada pelos provetes e, no caso do filamento de ABS, verificou-se que a extrusão reduziu significativamente a extensão máxima [16,18]. Similarmente, [17] também revelou que, tanto no caso de PLA como de ABS, os filamentos ensaiados eram mais rígidos e mais resistentes do que os provetes (formados por apenas uma camada e com os filamentos a 0º relativamente à direcção de aplicação da força).

- Tratamentos térmicos

Apesar das características do processo, as peças produzidas por FDM podem ser optimizadas por forma a obter propriedades previamente estabelecidas. Em [20] mostrou-se que as propriedades finais de peças produzidas por FDM podem ser previstas, sendo para isso necessário controlar alguns parâmetros durante o seu fabrico. Neste caso, concluiu-se que o tratamento térmico posteriormente aplicado à peça produzida tinha efeitos inversos em algumas propriedades finais obtidas, nomeadamente no que diz respeito à ductilidade e à resistência. Um aumento do tempo de tratamento térmico aplicado conduziu a uma diminuição significativa da extensão na fractura, um aumento da tensão máxima e ainda um aumento da variação dos resultados obtidos; já uma diminuição do tempo de tratamento conduziu a efeitos opostos, sendo assim esta uma variável conflituosa quando se pretende optimizar uma destas propriedades. Foi também possível concluir que a tensão máxima de peças produzidas por FDM se podem aproximar da tensão máxima de peças produzidas a partir de PLA “maciço”, desde que as restantes variáveis sejam optimizadas para a propriedade desejada.

2.3. Polímeros

Apresenta-se nesta secção algumas características do material utilizado neste trabalho, o PLA, bem como uma breve descrição acerca dos polímeros.

2.3.1. Definições e comportamento

O desenvolvimento dos plásticos iniciou-se há cerca de 100 anos. Não obstante, já anteriormente se recorria a materiais naturais que apresentavam propriedades semelhantes a estes [27, 28].

Em 1855, Alexander Parkes foi o responsável pelo primeiro plástico feito pelo homem. Actualmente conhecido como celuloide, foi na época denominado “*Parkesine*” e apresentado em 1862 na *Great International Exhibition*, em Londres [27, 28].

Em 1907, o primeiro polímero sintético e produzido em massa, denominado “Bakelite”, foi desenvolvido por Leo Baekland. [27, 28] Depois de produzida, a Bakelite não podia voltar a ser fundida [28].

Desde então, muitos plásticos foram desenvolvidos, oferecendo uma grande variedade de características e propriedades [27, 28].

Os polímeros são formados por várias moléculas que se repetem ao longo de uma cadeia polimérica às quais se dá o nome de monómeros. O processo de polimerização consiste na ligação linear e covalente de vários monómeros entre si, dando origem a cadeias longas. Um exemplo simples é o Polietileno, que resulta da polimerização do monómero etileno [29].

Estes materiais podem ser agrupados com base na sua estrutura molecular e consequente comportamento.

Os termoplásticos são polímeros cujas cadeias poliméricas estão enroladas entre si, sem terem ligações fortes. Assim, quando aquecidos, as ligações secundárias (forças de Van der Waals ou pontes de hidrogénio) entre as moléculas são quebradas, permitindo que o polímero se comporte como um líquido viscoso e possa ser moldado [30].

As cadeias poliméricas podem também formar ligações fortes (covalentes) entre si, constituindo nesse caso um termoendurecível. Este tipo de polímero resulta da reacção entre uma resina e um endurecedor. Depois de solidificados, as ligações cruzadas existentes fazem com que, quando aquecidos, os termoendurecíveis possam amolecer mas não voltem ao estado líquido. A continuação de adição de calor faz com o polímero se degrade. Assim, contrariamente ao que acontece com os termoplásticos, depois de solidificado este tipo de polímero não pode voltar a ser moldado. [29, 30]

Os elastómeros (ou borrachas) têm uma estrutura intermédia entre os dois casos anteriores, isto é, são polímeros lineares cujas cadeias, ocasionalmente, formam ligações fortes entre si. Neste tipo de polímeros, algumas das ligações secundárias existentes estão já desfeitas à temperatura ambiente [30]. Uma das principais características deste tipo de polímeros é a sua capacidade de sofrer grandes deformações e depois recuperar a sua forma original.

Ao contrário do que se verifica nos metais, cujas estruturas são altamente orientadas e organizadas (estruturas cristalinas), a maior parte dos polímeros formam, durante o arrefecimento, estruturas desorganizadas e enleadas, isto é, estruturas amorfas (figura 2-9) [29].

Os polímeros amorfos podem ser manipulados por forma a induzir alguma orientação à sua estrutura [29]. No caso dos termoplásticos, cujas cadeias são lineares e sem ligações cruzadas fortes, este processo pode dar origem a regiões onde se verifica não só o alinhamento das cadeias, mas também alguma organização tridimensional. Estas regiões cristalinas coexistem com algumas regiões amorfas e o polímero diz-se semicristalino [29, 30].

De forma semelhante, os polímeros semicristalinos podem ser processados de forma a que a sua cristalinidade seja reduzida e se formem estruturas amorfas [31].

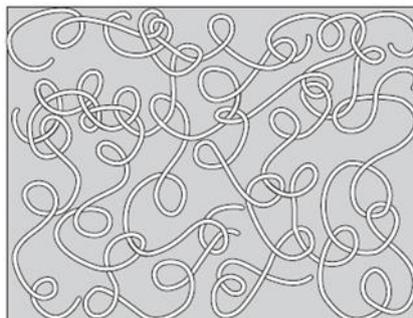


Figura 2-9 Representação esquemática de uma estrutura amorfa (adaptado de [29])

Entende-se por comportamento mecânico a resposta de um material (nomeadamente, no que diz respeito a deformações) quando é sujeito a uma determinada carga [29, 32].

A caracterização mecânica dos polímeros tem como objectivo não só avaliar o seu comportamento macroscópico, mas também tentar relacionar o comportamento observado com a estrutura molecular do polímero em questão [29, 32].

As condições de teste, como por exemplo a velocidade de deformação e a temperatura, influenciam significativamente o comportamento mecânico dos polímeros, tornando difícil a sua classificação. O comportamento pode tomar características de sólido frágil, líquido viscoso, e outros estados intermédios [29, 30, 33] (figura 2-10). Estas variações também se podem verificar nos materiais cerâmicos e metálicos, no entanto, nesses casos estas alterações ocorrem a temperaturas bastante afastadas da temperatura ambiente [30].

A temperatura de transição vítrea marca o início do amaciamento do polímero, isto é, o momento em que o comportamento do polímero se começa a afastar do tipo sólido e frágil e começa a apresentar características viscosas [29, 30].

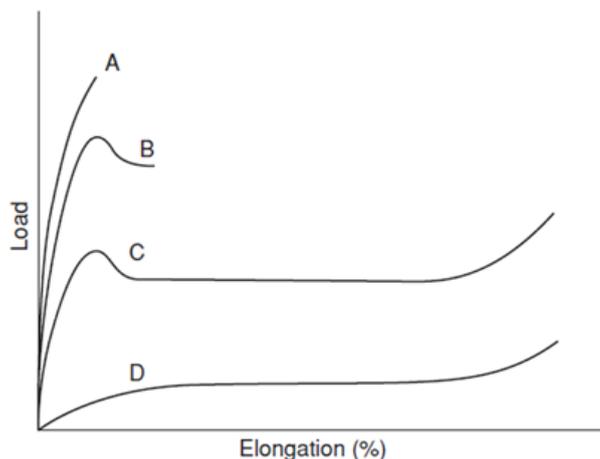


Figura 2-10 Curva força-deslocamento para um polímero a diferentes temperaturas [29]

O comportamento mecânico diz-se elástico quando existe uma relação reversível entre a carga aplicada e a deformação resultante, isto é, o material altera a sua forma como consequência da carga aplicada e, quando é descarregado, recupera a sua forma original. No caso de um carregamento uniaxial, a Lei de Hooke é a equação constitutiva utilizada para descrever aproximadamente este comportamento:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

onde σ é a tensão no material, E é o módulo de elasticidade e ε a extensão do material.

No caso do comportamento viscoso, as deformações mantêm-se mesmo após a remoção da carga. Neste tipo de comportamento, a resposta ao nível da tensão depende da velocidade de deformação imposta. Se esta relação for linear, o material diz-se Newtoniano e, por exemplo, em casos de corte simples, verifica-se:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

em que τ é a tensão, $\dot{\gamma}$ a velocidade de deformação e η a viscosidade do material [32]

O comportamento Newtoniano só se verifica com velocidades de deformação baixas. Quando a velocidade aumenta, passa a ter influência na viscosidade e torna-se necessário aplicar modelos que a descrevam [32].

O comportamento do material pode apresentar, simultaneamente, características elásticas e viscosas: diz-se, nesse caso, viscoelástico. Uma das principais características deste tipo de comportamento é a sua elevada dependência do tempo. O comportamento viscoelástico pode ainda ser classificado como: viscoelástico linear, caso, para além do tempo, seja dependente apenas da temperatura; ou viscoelástico não linear, caso seja dependente não só da temperatura, mas também da intensidade da carga aplicada. No caso da viscoelasticidade linear, o comportamento pode ser descrito como uma combinação das relações de Hooke e de fluido Newtoniano [32].

O comportamento de polímeros vítreos (*glassy polymers*) (isto é, polímeros cuja temperatura de transição vítrea é superior à temperatura ambiente, fazendo com que, à temperatura ambiente, estes se encontrem no seu estado vítreo [34]) tem sido amplamente investigado. Em particular, têm sido desenvolvidos esforços no sentido de tentar justificar o seu comportamento para lá da região definida como cedência, onde, tipicamente, se verificam dois fenómenos: uma queda da tensão imediatamente após o ponto de cedência e, para deformações maiores, uma inversão deste comportamento, ou seja, um novo aumento de tensão com o aumento da deformação (figura 2-11). Esta queda tem sido encarada como um amaciamento intrínseco do material, não existindo ainda uma explicação unanimemente aceite para justificar este fenómeno. Um estudo realizado por *van Melick et al* [33] afirma que o amaciamento pode estar ligado ao processo de envelhecimento do polímero e que influencia o aparecimento de deformação plástica localizada. Afirma ainda que a amplitude do amaciamento é influenciada pela temperatura e pela velocidade de deformação Também Chen e Schweizer [35] afirmam que a amplitude final do amaciamento resulta da contribuição de dois fenómenos, o envelhecimento e o rejuvenescimento do polímero. Os mesmos autores identificam ainda cinco fases típicas da resposta de um polímero quando sujeito a uma taxa de deformação constante: duas fases distintas até ao ponto máximo, sendo uma delas linear e elástica, seguida de um regime inelástico no qual a relação entre a tensão e a extensão deixa de ser linear; a ocorrência de um ponto máximo e de um amaciamento imediatamente após este, seguidos de um patamar aproximadamente constante; por fim, um endurecimento do material ou a sua falha.

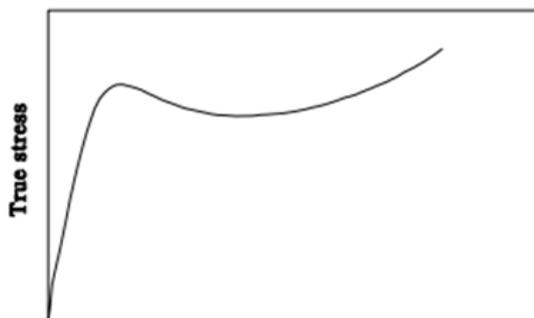


Figura 2-11 Curva tensão-extensão característica de um polímero amorfo [33]

Em *Miehe et al.*[36] são também identificadas diversas fases de uma curva tensão-extensão, entre as quais se encontram as duas regiões existentes antes do ponto máximo (figura 2-12). Os autores afirmam que a transição gradual do regime linear para o não linear é ilustrativa do comportamento viscoelástico do polímero. Afirmam ainda que a deformação para lá do ponto de cedência conduz ao aparecimento de micro zonas de deformação localizada que dão origem ao amaciamento visível na curva e que durante este amaciamento estas zonas se vão multiplicando e combinando, dando origem uma zona de deformação plástica localizada macroscópica.

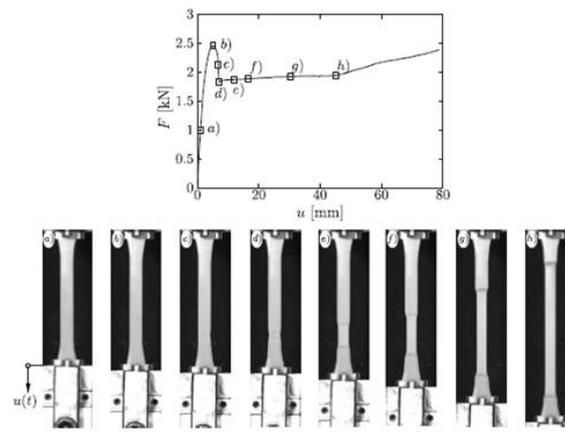


Figura 2-12 Curvas força-deslocamento e fotografias em diversos instantes da deformação [36]

2.3.2. PLA

O *Polylactic Acid* - PLA (Ácido Poliláctico) é um polímero termoplástico derivado do ácido láctico. Pode ser produzido através de polimerização por abertura de anel ou polimerização por condensação, tendo o tipo de polimerização influência no peso molecular do polímero [37] o que, por sua vez, influencia a sua degradação e as suas propriedades [38]. Os monómeros de ácido láctico podem ser obtidos a partir de um processo de fermentação através de bactérias usando como substrato, por exemplo, milho, batata ou cana de açúcar [37]. O ácido láctico possui dois estereoisómeros, ou seja, dois isómeros cuja constituição é idêntica, variando entre si apenas na disposição espacial [37, 39]. É biocompatível e biodegradável, factos que se apresentam como enormes atractivos para aplicações médicas e utilização em embalagens. Como pode ser obtido a partir de fontes renováveis e, após utilização, pode ser eliminado por compostagem, é encarado como uma alternativa aos plásticos derivados do petróleo e como uma possível solução para o problema da acumulação de plástico. Embalagens baseadas em PLA já são utilizadas com produtos alimentares na Europa, Japão e América do Norte [37].

A utilização de PLA em aplicações médicas é de grande interesse devido à sua capacidade de ser reabsorvido, mas também pela possibilidade de adaptar as suas propriedades mecânicas tendo em conta a aplicação pretendida [38, 40].

O grande interesse na utilização estereoisómeros de PLA em, por exemplo, suturas e implantes justifica o empenho em tentar compreender o comportamento deste material, por forma a justificar o tipo de falhas que vão sendo verificadas e, se possível, tentar evitá-las.

Os estudos referidos de seguida mostram que o PLA exibe algumas características e comportamentos típicos dos polímeros vítreos e amorfos referidas anteriormente.

Engels et al. [31] começam por mostrar o comportamento típico do polímero avaliado quando este é comprimido com uma taxa de deformação verdadeira constante. Pode observar-se na figura 2-13 que o material começa por se comportar de forma linear-elástica até que atinge um máximo. Este ponto corresponde ao ponto de cedência e, posteriormente à ocorrência deste, verificam-se dois comportamentos distintos: inicialmente, dá-se um amaciamento do material, ou seja, um aumento da deformação sem um correspondente aumento da tensão, o que significa que é necessária menos energia para impor mais deformação; seguidamente, verifica-se o encruamento do material, voltando a verificar-se a necessidade de uma aumento da tensão de forma a obter uma aumento da deformação, o que implica que é necessária mais energia para impor mais deformação.

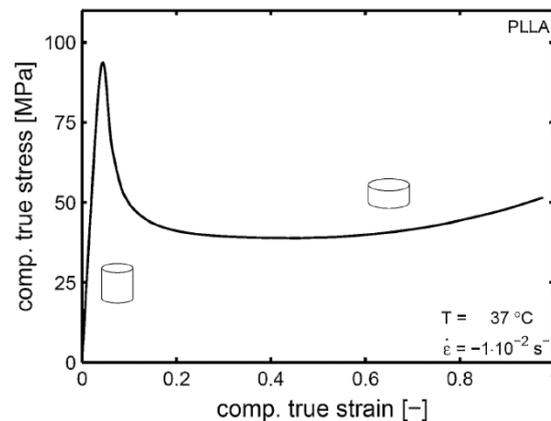


Figura 2-13 Curva tensão-extensão verdadeira de um provete de PLA à compressão [31]

Os polímeros baseados em ácido láctico evidenciam no seu comportamento uma elevada dependência no tempo. Este facto leva a que, por exemplo, no caso de aplicações médicas, o componente possa falhar prematuramente, isto é, antes do tempo em que seria expectável a sua falha devido à degradação, mesmo em condições em que a carga aplicada é inferior à tensão de cedência (figura 2-14) [31,40].

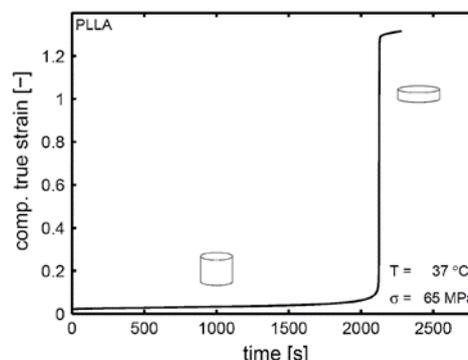


Figura 2-14 Curva tensão-extensão verdadeira de um provete de PLA à compressão sob tensão constante [31]

O comportamento do material é influenciado não só pelo tempo, mas também pela carga aplicada. Verifica-se que um aumento da tensão aplicada reduz o tempo até à fractura. Para além disso, observa-se também que um aumento da taxa de deformação aplicada conduz a um aumento da tensão de cedência. Este tipo de resposta pode ser justificado através da estrutura molecular do material em questão. A facilidade com que as cadeias poliméricas se podem movimentar depende altamente da temperatura: quanto mais elevada a temperatura, mais facilmente as cadeias podem mudar a sua configuração. Verifica-se que a carga aplicada tem um efeito semelhante ao da temperatura, isto é, mesmo estando os polímeros no seu estado vítreo, um aumento da carga induz um aumento da mobilidade das cadeias poliméricas [31].

2.4. Utilização de PLA no processo FDM

No processo FDM são utilizados termoplásticos sob a forma de filamento, que podem ou não ser reforçados com fibras [2]. Os polímeros mais comumente utilizados incluem, por exemplo, Polycarbonate - PC (Policarbonato), Polyethylene Terephthalate - PET (Politereftalato de Etileno), Acrylonitrile Butadiene Styrene - ABS (Acrlonitrilo butadieno estireno) e Polylactic Acid - PLA, sendo estes dois últimos os mais utilizados nas impressoras de secretária [12].

O PLA apresenta uma temperatura de transição vítrea de aproximadamente 60°C e uma temperatura de fusão no intervalo de 145°C-160°C [25, 41]. A baixa temperatura de fusão deste material pode ser encarada como uma vantagem, uma vez que possibilita o seu processamento com menores gastos de energia, comparativamente a outros termoplásticos. Por outro lado, este facto implica que os objectos fabricados em PLA apresentem piores desempenhos a altas temperaturas [19, 25]. O PLA apresenta também um coeficiente de expansão térmica relativamente baixo, o que possibilita obter peças com mais qualidade, uma vez que origina menores tensões residuais e menores empenos aquando do arrefecimento [17, 19].

O elevado consumo deste material conduz à necessidade de desenvolver formas de lidar com os seus resíduos. Alguns comerciantes incluem filamento reciclado na sua gama de produtos. Alternativamente, são também já comercializados aparelhos que permitem aos consumidores reciclar e extrudir o seu próprio filamento em casa [42]. Estudos realizados revelaram que as propriedades mecânicas dos provetes impressos com filamento reciclado eram ligeiramente inferiores às dos provetes impressos com o filamento "original". Esta diminuição pode ser devida à degradação das propriedades do próprio filamento ou devido a problemas na impressão causados pela utilização de filamento reciclado. O aumento da variabilidade dos resultados revelou-se um efeito mais significativo do que a diminuição das propriedades mecânicas. Para além disso, a utilização de filamento reciclado está também associada a um aumento do nível de emissão de partículas ultrafinas durante a impressão (o que pode ter consequências nefastas para a saúde) [42].

Tal como já referido anteriormente, o ABS e o PLA apresentam-se como dois dos polímeros mais utilizados nas impressoras 3D de secretária, o que torna interessante a comparação entre eles. O PLA apresenta menor coeficiente de expansão térmica face ao ABS, o que origina menos empenos e, conseqüentemente, uma peça com maior qualidade. Relativamente à resistência mecânica, ensaios

realizados a fios de PLA e de ABS revelaram valores do módulo de Young e da tensão máxima muito superiores para o primeiro. O PLA apresenta também vantagens no que respeita à emissão de partículas aquando da impressão (com níveis de emissão inferiores aos do ABS). No entanto, tem um pior desempenho a temperaturas elevadas e uma durabilidade inferior à do ABS (por ser biodegradável) [17]. Um outro estudo testou provetes de ABS e de PLA, fazendo variar alguns parâmetros de impressão, tendo concluído que, para o PLA, a variação dos parâmetros estudados era acompanhada de uma maior variação nos valores das propriedades finais do que no caso do ABS [43].

3. Métodos

Neste capítulo são descritos os principais métodos e equipamentos utilizados no trabalho experimental desenvolvido no âmbito desta dissertação.

A primeira fase do trabalho experimental consistiu na impressão de provetes com diferentes direcções de impressão e percentagens de enchimento, destinados à caracterização mecânica através de ensaios de compressão e tracção uniaxiais. Assim, no início deste capítulo começa por se apresentar a impressora 3D utilizada para o efeito, sendo ainda efectuada a descrição detalhada dos principais parâmetros utilizados e das características geométricas de cada provete.

Descrevem-se também os procedimentos utilizados na medição dos provetes, realizada com o objectivo de determinar não só as suas dimensões, mas também as suas densidades. A determinação das densidades foi realizada recorrendo ao princípio de Arquimedes. Esta metodologia permitiu ainda determinar o volume de cada provete bem como o valor médio da percentagem de enchimento.

Por fim, descrevem-se os ensaios experimentais seleccionados para a aferição do comportamento mecânico das estruturas impressas, neste caso, ensaios de tracção e de compressão uniaxiais quase-estáticos e cíclicos.

3.1. Instalação/Impressora

A primeira etapa da parte experimental é, depois de definida e modelada a geometria, a construção dos provetes. A impressora utilizada neste trabalho foi a *Ultimaker 3 Extended* (figura 3-1) [44].



Figura 3-1 Impressora Ultimaker 3 Extended

Esta impressora possui uma mesa de impressão de vidro aquecida, cuja temperatura pode ir até aos 100°C, de dimensões 215x215 mm². Relativamente à *Ultimaker 3*, o modelo *Ultimaker 3 Extended* possui uma altura de 300 mm em vez de 200 mm, o que resulta num volume de construção

de 215x215x300 mm³, caso a peça seja construída com apenas um dos nozzles ou 197x215x300 mm³, caso a peça seja impressa com os dois *nozzles*. Atinge uma velocidade de construção até 24 mm³/s, as temperaturas dos *nozzles* variam entre 180°C e 280°C e o seu diâmetro influencia a resolução máxima de cada camada [45].

Ao contrário de diversas impressoras que são comercializadas em kits e que são posteriormente montadas, a *Ultimaker 3 Extended* necessita apenas da instalação de alguns acessórios para poder começar a operar.

Quando a impressora é retirada da caixa, é apenas necessário retirar algumas fitas de segurança, instalar o suporte para o material que será utilizado e conectar o respectivo cabo de alimentação (uma vez que a impressora possui um sistema que lhe permite identificar o material que está colocado), colocar na sua posição a mesa de impressão e ligar a impressora à corrente eléctrica. Depois de a iniciar pela primeira vez, o utilizador é conduzido no processo de *set-up* inicial, que inclui a montagem das cabeças de impressão (*print cores*), a montagem do material e, se for caso disso, a conexão da impressora à internet. Esta ligação tem como vantagem a actualização automática do *firmware* da impressora, para além de permitir que os ficheiros sejam enviados directamente do software Cura para a impressora, sem necessidade de recorrer a uma *pen*, por exemplo. A impressora possui também uma câmara que permite, com a conexão à internet, acompanhar o processo de impressão à distância, através da *app* da *Ultimaker*.

Os *print cores* podem ser de dois tipos: AA, para materiais de construção e *Breakaway* (tipo de polímero utilizado como material de suporte); e BB, para material de suporte solúvel (PVA - *polyvinyl alcohol* (Álcool polivinílico)). A impressora vem equipada com um *print core* do tipo AA já instalado na cabeça de impressão, fornecendo ainda um segundo *print core* do tipo AA e um do tipo BB, podendo qualquer um deles ser instalado juntamente com o anterior. Os *print cores* fornecidos têm todos um diâmetro de 0,4mm. Para além destes, a marca disponibiliza ainda diâmetros de 0,25mm e de 0,8mm para *print cores* AA e de 0,8mm para *print cores* BB.

Já faz parte da oferta da marca um terceiro tipo de *print core*, CC, destinado a materiais compósitos. No entanto, este destina-se apenas à *Ultimaker S5* [44].

Apesar de a cabeça de impressão ter dois *print cores* instalados, a impressora pode funcionar com apenas um material colocado, e, conseqüentemente, com apenas um *print core* em utilização. Caso se pretendam instalar dois materiais (que podem ser diferentes, ou não), começa por colocar-se no suporte o correspondente ao segundo *print core*, ficando o material correspondente ao primeiro mais afastado da parte de trás da impressora. Se as bobines de filamento instaladas forem da marca *Ultimaker*, a impressora será capaz de o identificar, tanto no que diz respeito ao tipo, como à cor. O material deve ser manualmente inserido nos tubos existentes, que o conduzem até à cabeça de impressão. Depois de estar parcialmente inserido, o sistema de alimentação de material da impressora leva o material até à cabeça de impressão, onde o *print core* correspondente é aquecido e extrude material. Quando é possível ver filamento a ser extrudido, é dada confirmação à impressora. A extrusão é interrompida, o *print cores* é arrefecido e o processo de carregamento do material dá-se por concluído.

Apesar de ser possível ao utilizador definir os parâmetros de impressos desejados, o Cura apresenta, com base na informação dos materiais que serão utilizados, parâmetros pré-definidos de

impressão otimizados para esse material, por exemplo, no que diz respeito a temperaturas de extrusão e da mesa de impressão.

3.2. Preparação dos provetes

3.2.1. Impressão

Relativamente aos parâmetros de impressão anteriormente referidos na secção 2.2.2.1, e tendo em consideração algum conhecimento já existente acerca da sua influência nas características mecânicas das estruturas impressas, utilizaram-se no âmbito deste trabalho alguns dos valores sugeridos pelo software Cura para o material utilizado. Relativamente aos parâmetros geométricos dos provetes, seleccionaram-se dois para estudo, a fim de avaliar a sua influência nas propriedades mecânicas das estruturas impressas, parâmetros esses que são descritos de seguida:

- ângulo de deposição – todos os provetes foram impressos com um padrão composto por linhas cujos ângulos faziam 0° , 90° e $\pm 45^\circ$ com uma direcção de referência, tal como ilustrado na figura 3-2. De acordo com o referencial da mesa de impressão, o lado maior dos provetes encontra-se alinhado com o eixo y, tal como representado na figura 3-3, que coincide também com a direcção de aplicação da carga, e por isso os ângulos de impressão referem-se também ao ângulo que os filamentos fazem com a direcção em que vão ser solicitados nos ensaios de compressão e tracção uniaxial.. Todos os provetes foram impressos na horizontal na mesa de impressão (dando origem a provetes com camadas paralelas à direcção de aplicação da força), garantindo assim que o ângulo varia relativamente à direcção segundo a qual a carga é aplicada (direcção de referência) (ver figura 3-3)

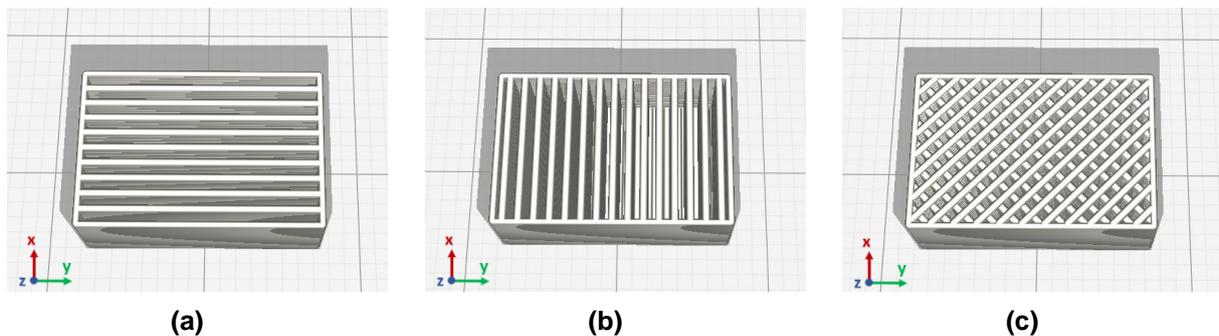


Figura 3-2 Ilustração dos ângulos de deposição em estudo: (a) 0° ; (b) 90° ; (c) $\pm 45^\circ$



Figura 3-3 Representação esquemática da direcção de aplicação da carga num ensaio de compressão uniaxial de um provetes impresso com ângulo de deposição de 90° (os ângulos de deposição mencionados neste trabalho têm como referência a direcção de aplicação da carga)

- o percentagem de enchimento – mantendo o padrão das linhas e os ângulos de deposição, foram impressos provetes com 50%, 75% e 100% de enchimento, tal como representado na figura 3-4 para o caso de um provete com ângulo de deposição de 90°

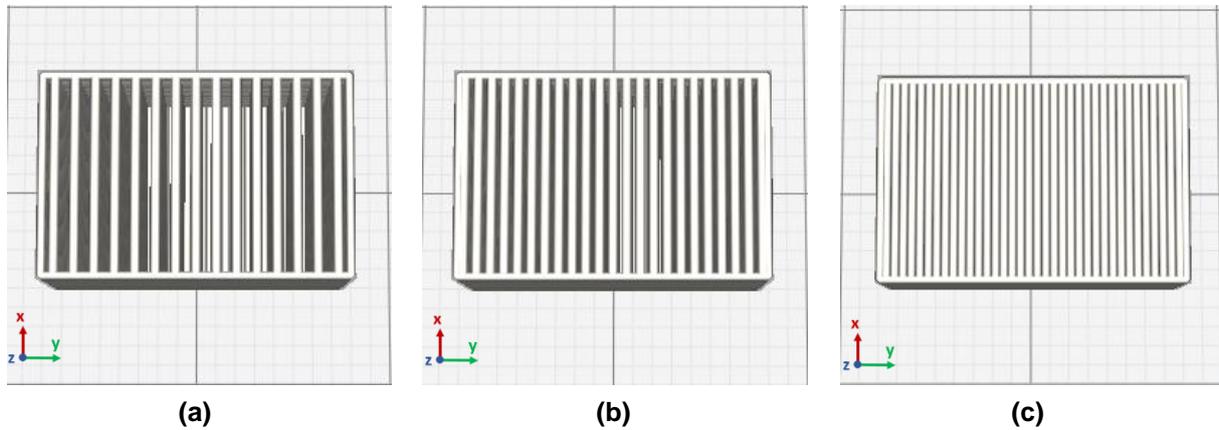


Figura 3-4 Ilustração das percentagens de enchimento: (a) 50%; (b) 75%; (c) 100%

O ponto de início de cada camada torna-se saliente em relação ao restante percurso do contorno. Se este ponto for coincidente em todas as camadas dá origem a uma “costura” ao longo da altura do objecto impresso, visível no fim da impressão. No caso dos provetes de compressão, o ponto de início de cada camada foi definido como “aleatório” de forma a tentar minimizar a existência dessa “costura” ao longo de uma das arestas do provete (figura 3-5). No caso dos provetes de tracção, o ponto escolhido foi sempre o mesmo em todas as camadas, sendo a sua localização um dos cantos do provete. Desta forma, a “costura” estará presente numa zona abrangida pelas amarras na máquina, de modo a não afectar os resultados dos ensaios experimentais.

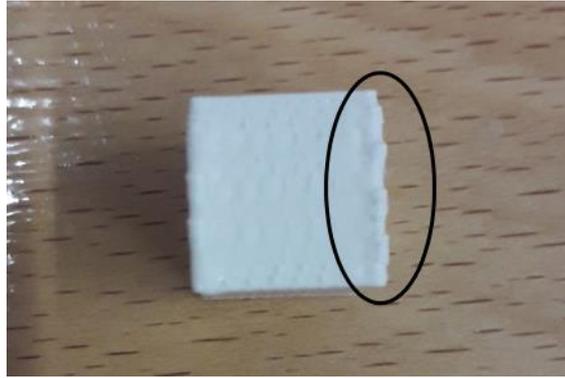


Figura 3-5 Representação do efeito do ponto de início de cada camada

Todos os provetes foram impressos com apenas um contorno exterior (de largura igual a 0,4 mm) e, no caso dos provetes cujas densidades eram inferiores a 100%, com duas camadas no topo e duas camadas na base completamente densas, isto é, como uma “caixa” de paredes sólidas com o interior com preenchimento não sólido (figura 3-6).

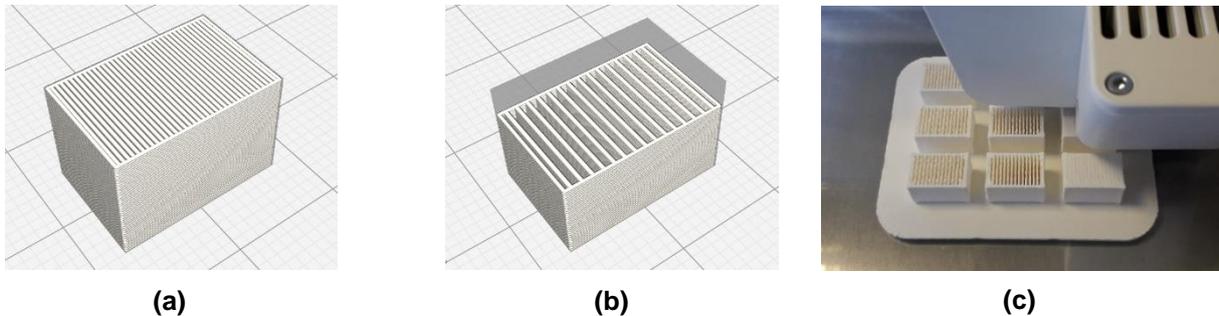


Figura 3-6 Representação esquemática da impressão de provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100%: (a) exterior do provete; (b) interior do provete; (c) provetes na mesa de impressão (com e sem camada densa no topo)

Os restantes parâmetros de impressão foram mantidos constantes. É o caso da espessura de cada camada, incluindo as de topo e as a base, definida como 0,2 mm; a temperatura de impressão, definida como 200°C; a temperatura da mesa de impressão, igual a 60°C; e a velocidade de impressão, de 70 mm/s.

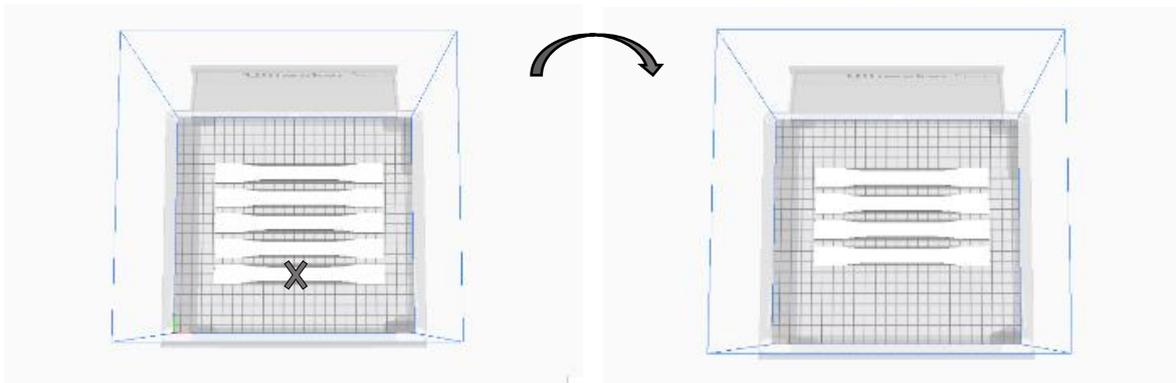


Figura 3-7 Representação esquemática do posicionamento dos provetes de tracção na mesa de impressão

Todos os 9 provetes de compressão de cada “grupo” foram impressos em simultâneo. Relativamente aos provetes de tracção, foram impressos em dois conjuntos, um com cinco provete e outro com quatro. Deste modo, perfaz-se o mesmo número de provetes para os casos de tracção e de compressão (nove). A opção de imprimir um conjunto de quatro provetes em vez de imprimir dois conjuntos de cinco foi tomada como tentativa de minimizar o tempo de impressão. A posição dos provetes na mesa de impressão foi mantida em ambos os conjuntos, tendo, no conjunto de quatro, sido retirado sempre o mesmo provete (como ilustrado na figura 3-7).

Para controlo e análise dos resultados foi necessário atribuir aos provetes de ambos os ensaios uma nomenclatura que permitisse identificar não só o número do provete a ser ensaiado, mas também as suas condições de impressão. Assim, relativamente às condições de impressão em estudo, os provetes foram denominados de acordo com a tabela 3-1:

Tabela 3-1 Denominação de cada grupo de variáveis

	0°	90°	±45°
50%	A	B	C
75%	D	E	F
100%	G	H	I

A numeração foi atribuída, para todas as condições de construção, de acordo com a localização espacial em que os provetes foram impressos, tal como representado na figura 3-8.

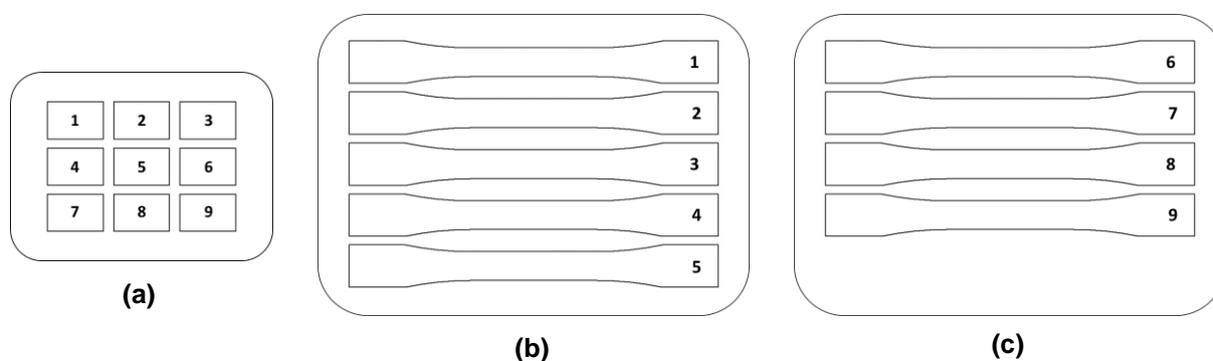


Figura 3-8 Esquema de numeração dos provetes: (a) de compressão; (b) e (c) de tracção

A impressão sobre a mesa de vidro confere um acabamento espelhado à face em contacto com esta. Enquanto em alguns casos este facto pode ser visto como uma vantagem (por ser considerado um bom acabamento superficial), ensaios preliminares deste trabalho revelaram que esta diferença da face em contacto com a mesa condicionava o modo de deformação dos provetes nos ensaios experimentais, contribuindo para uma deformação não homogénea dos mesmos. Assim, foi decidido imprimir todos os provetes (de compressão e de tracção) sobre uma base, também ela impressa e removida depois da impressão, com o objectivo de aproximar o acabamento da face inferior (que, sem a base amovível, estaria em contacto com a mesa) do acabamento das restantes faces dos

provetes. Esta base (denominada *raft* e representada na figura 3-9) é definida no Cura e permite que os provetes sejam dela separados com alguma facilidade.

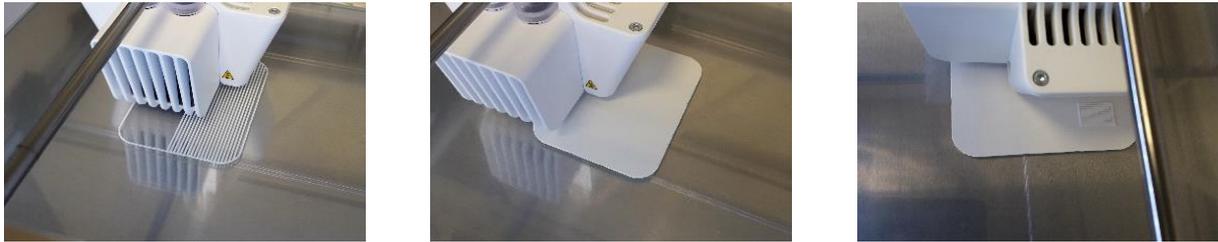


Figura 3-9 Etapas de construção do raft

Os ensaios experimentais foram realizados numa máquina de ensaios mecânicos universal *Instron 5966* [46], existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Secção de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico (figura 3-10). Este equipamento permite realizar, entre outros, ensaios de fluência, tracção, compressão, corte, flexão e cíclicos. A célula de carga instalada permite aplicar até 10 kN de força.

Para alternar entre os diversos tipos de ensaio que a máquina permite realizar, é necessário alterar os seus acessórios, tendo sido utilizados neste trabalho amarras para o ensaio de tracção e pratos compressores para os ensaios de compressão, conforme ilustrado na figura 3-10.



Figura 3-10 Instron 5966 utilizada nos ensaios de caracterização mecânica com acessórios para realizar os ensaios de compressão uniaxial (esquerda) e de tracção uniaxial (direita)

O controlo da máquina e, conseqüentemente, dos parâmetros de cada ensaio é feito a partir de um software específico, o *Bluehill*. Este software permite definir o tipo de ensaio, bem como o tipo de controlo que se pretende durante o mesmo (isto é, em força ou em deslocamento, por exemplo). Para além disso, permite ainda definir que tipo de gráfico e de valores se pretende visualizar no monitor durante o ensaio, bem como os valores que se pretende registar (por exemplo, enviando-os para um ficheiro *Excel*). Existem alguns ensaios pré-definidos que podem ser utilizados como se encontram ou modificados, no entanto, também é possível criar um método de raiz para cada ensaio.

Além da força aplicada, a máquina regista o deslocamento do travessão. Para além disso, permite ainda a montagem de extensómetros. O software permite definir a frequência de aquisição de dados, ou seja, a frequência com que estes valores são registados.

3.2.2. Pesagem

Após serem impressos, e antes dos ensaios mecânicos, efectuou-se a pesagem de todos os provetes de compressão numa balança de precisão *Mettler Toledo ML204*, representada na figura 3-11. A utilização de um *kit* de densidades (*Density Kit ML-DNY-43*) permitiu ainda aferir a densidade de cada um dos provetes, antes e depois de cada ensaio, através do princípio de Arquimedes. Estes resultados permitiram avaliar as percentagens de enchimento dos provetes impressos, bem como a variação de volume durante os ensaios de compressão uniaxial.



Figura 3-11 Balança de precisão Mettler Toledo ML204

O princípio de Arquimedes permite calcular o volume de um corpo imerso num líquido através da diferença entre o seu peso no ar e o respectivo peso quando imerso num líquido do qual se conhece a densidade. A balança permite utilizar como líquidos auxiliares pré-definidos a água destilada e o etanol. Assim, se o líquido utilizado for um dos anteriores, é apenas necessário fornecer à balança a temperatura à qual se encontra o líquido aquando das pesagens, uma vez que o seu software tem informação relativa à densidade destes dois líquidos a várias temperaturas. Tendo definido qual o líquido utilizado e a sua temperatura, pode dar-se início às medições. A balança começa por requerer ao utilizador que o provete seja pesado no ar, num dos pratos disponíveis para o efeito (figura 3-12 a)); de seguida, é solicitado que o provete seja pesado dentro do líquido auxiliar (figura 3-12 b)); por fim, a balança exhibe o valor da densidade já calculado. Para a pesagem no líquido, o material deve ser colocado no cesto presente no *kit* e apropriado para o efeito. Este cesto permite a inversão da sua

concavidade, de forma a pesar materiais cuja densidade é inferior à da água e que, portanto, não afundam e, conseqüentemente, não poderiam ser pesados (figuras 3-12 b) e c)).

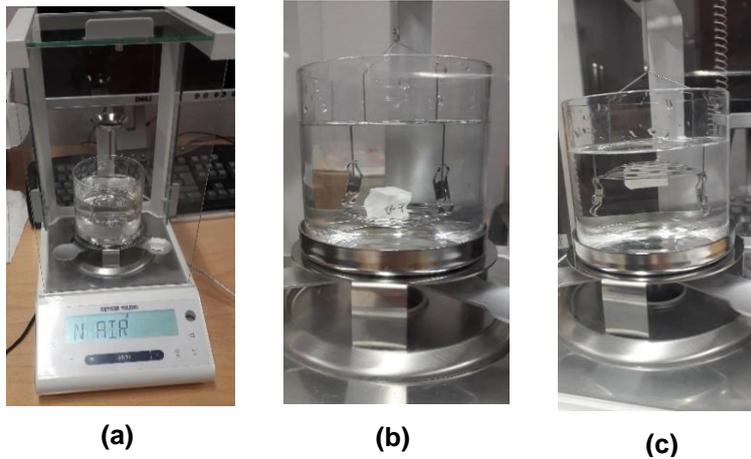


Figura 3-12 Etapas da medição da densidade: (a) pesagem no ar; (b) pesagem no líquido; (c) pesagem no líquido com o cesto invertido

A densidade de cada provete foi calculada do seguinte modo:

$$\rho = \frac{P_A}{P_A - P_B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (3.1)$$

onde, ρ [g/cm^3] é a densidade do material em análise, P_A [g] é o peso do material no ar, P_B [g] é o peso do material imerso no líquido auxiliar, ρ_0 [g/cm^3] é a densidade do ar e ρ_L [g/cm^3] é a densidade do líquido auxiliar.

As medições intermédias para a determinação da densidade de cada provete permitiram ainda o cálculo do seu volume, através da seguinte expressão:

$$V = \alpha \frac{P_A - P_B}{\rho_0 - \rho_L} \quad (3.2)$$

onde V [cm^3] é o volume do material, α é um factor de correcção do peso ($\alpha = 0.99985$) indicado no manual da balança utilizada, P_A e P_B são novamente os pesos do material no ar e no líquido auxiliar, respectivamente e, da mesma forma, ρ_0 e ρ_L são novamente as densidades do ar e do líquido auxiliar, respectivamente

Todos os provetes foram pesados antes e após serem ensaiados. Na tentativa de avaliar qual a influência que o processo de extrusão tem no material, para além dos provetes foram também pesadas duas porções de filamento, uma delas retirada directamente da bobine de material e outra de filamento

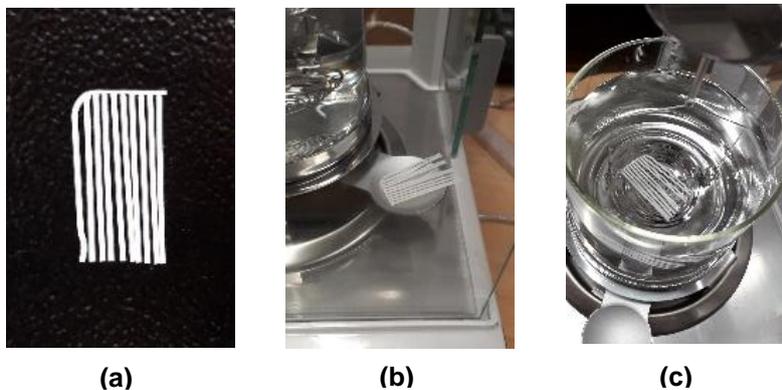


Figura 3-13 Medição da densidade do filamento após extrusão: (a) conjunto de filamentos usado para medição; (b) pesagem no ar; (c) pesagem no líquido

após ser extrudido. Devido às dimensões reduzidas do filamento extrudido, para a avaliação da densidade após extrusão utilizou-se um pequeno conjunto de filamentos em vez de apenas um filamento individual (figura 3-13).

3.3. Ensaio de caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica podem ser classificados como dinâmicos, estáticos ou quase-estáticos.

Em ensaios dinâmicos, o objecto de estudo é sujeito a cargas oscilatórias que variam com uma determinada frequência.

Os ensaios estáticos destinam-se a avaliar o comportamento do material quando é sujeito a uma força ou deformação constante. São exemplos deste tipo de ensaios o ensaio fluência e ou ensaios de relaxação, respectivamente. No primeiro, é imposta uma força/tensão constante e regista-se a evolução da deformação/extensão ao longo do tempo. No segundo, é imposta uma deformação/extensão constante e regista-se a evolução da força/tensão durante a duração do ensaio (figura 3-14)

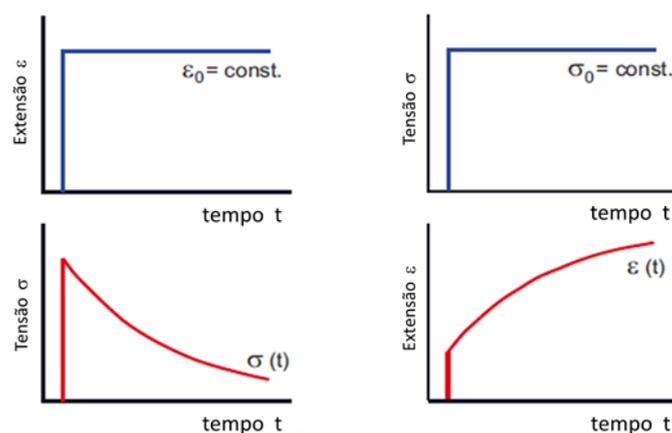


Figura 3-14 Representação de ensaios de relaxação de tensão (esquerda) e de fluência (direita)

Nos ensaios quase-estáticos os provetes são ensaiados impondo uma velocidade de deformação reduzida até à rotura ou até atingirem um valor pré-determinado de carga, enquanto se regista a evolução da força/tensão em função do deslocamento/extensão.

É nesta última categoria que se enquadram os ensaios experimentais realizados neste trabalho. Apesar do grande desenvolvimento, interesse e utilização do fabrico aditivo de polímeros, ainda não existem ensaios normalizados específicos para a obtenção das propriedades mecânicas, encontrando-se neste momento estas normas em desenvolvimento. Relativamente ao fabrico aditivo em geral, existem somente normas que dizem respeito sobretudo a questões de nomenclatura e classificações de processos (como por exemplo a *ISO/ASTM 52900 - Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*).

Face a esta ausência, têm sido adoptadas para os ensaios mecânicos de estruturas produzidas por FDM as normas respeitantes aos ensaios de plásticos. Assim, no âmbito deste trabalho utilizaram-se as normas ASTM D 638 para determinação das propriedades à tracção e a norma ASTM D 695 para

determinação das propriedades à compressão. As normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) foram escolhidas em detrimento das ISO (*International Organization for Standardization*) por serem as eleitas na maioria da bibliografia da especialidade.

3.3.1. Ensaios de compressão

Conforme referido acima, a norma ASTM D695 foi utilizada como referência para a realização dos ensaios de compressão uniaxial. No entanto, uma vez que os testes preliminares deste trabalho revelaram que a força necessária para comprimir os provetes indicados nesta norma (paralelepípedos com $12,7 \times 12,7 \times 25,4 \text{ mm}^3$) excedia a capacidade da máquina de ensaios mecânicos utilizada, optou-se por alterar as dimensões sugeridas, mantendo a geometria paralelepipedica, para uma base quadrada com 10 mm de lado e com uma relação entre o lado da base e a altura igual a 1,5, ou seja, uma altura de 15 mm (figura 3-15), de modo a tentar assegurar a deformação uniforme dos provetes durante o ensaio. A figura 3-16, retirada do software Cura, mostra a colocação dos provetes na mesa de impressão.

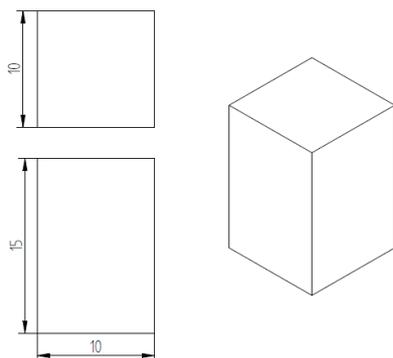


Figura 3-15 Esquema dos provetes de compressão ensaiados

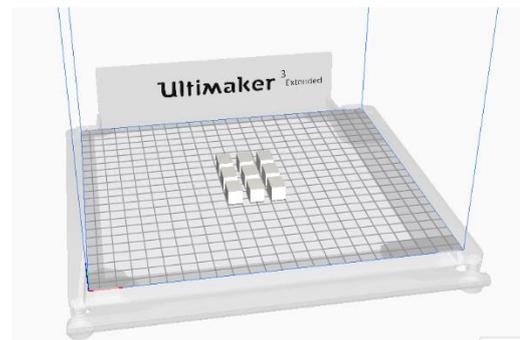


Figura 3-16 Disposição dos provetes de compressão na mesa de impressão

Os ensaios foram realizados com a velocidade de deslocamento do prato compressor indicada na norma, ou seja, $v=1,3 \text{ mm/min}$. Sendo a velocidade de deslocamento constante, a velocidade de deformação (que depende da altura do provete a cada instante) é variável. Tendo em consideração que a altura dos provetes de compressão impressos é 15 mm, a velocidade de deformação em cada ensaio não variou, tomando valores de, aproximadamente, $\dot{\epsilon} = 0.001 - 0.002 \text{ s}^{-1}$.

Para cada combinação de ângulo de deposição e percentagem de enchimento foram ensaiados cinco provetes. Para minimizar o efeito do atrito e tentar assegurar deformação uniforme no decorrer do ensaio, todos os ensaios de compressão foram realizados com fita de *teflon* de espessura reduzida na interface entre os provetes e os pratos compressores (ver figura 3-17).



Figura 3-17 Ensaio de compressão com fita de teflon na interface entre o provete e os pratos compressores

Durante cada ensaio de compressão uniaxial registaram-se os valores de força aplicada e o correspondente valor de deslocamento do prato compressor (que permitiu contabilizar a variação de altura de cada provete) a cada 0,1 s, ou seja, em cada segundo foram registados dez valores de força-deslocamento. Estes dados experimentais permitiram não só traçar a curva força-deslocamento de cada ensaio, mas também obter a curva tensão-extensão nominal, uma vez que se procedeu ao levantamento dimensional de cada provete de cada provete antes de cada ensaio. A tensão nominal foi determinada através de:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (3.3)$$

em que, $S [MPa]$ é a tensão nominal, $F [N]$ a força aplicada e $A_0 [mm^2]$ a área de secção inicial do provete.

A extensão nominal foi obtida através de:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (3.4)$$

em que $e [mm/mm]$ é a extensão nominal, $l_0 [mm]$ a altura inicial do provete e $\Delta l = l_0 - l [mm]$ corresponde à variação de altura. Importa referir que os valores de extensão calculados deste modo correspondem aos valores absolutos uma vez que a deformação ocorreu devido à redução de altura

De acordo com a norma utilizada, são instantes de interesse no comportamento mecânico o ponto de cedência, o ponto de força/tensão máxima e o ponto de fractura.

No caso dos polímeros, a cedência é definida como o ponto em que um aumento da extensão nominal ocorre sem um aumento da tensão nominal correspondente. O instante em que surgir alguma fractura no provete de compressão é identificado como ponto de fractura. O ponto de força/tensão máxima pode coincidir com o ponto de cedência ou com o ponto de fim do ensaio (em casos em que a tensão volta a crescer após a cedência), seja ele por fractura ou não.

Os ensaios de compressão uniaxial permitem ainda determinar o módulo de elasticidade de cada provete através do declive da região linear inicial da curva tensão-extensão nominal, dado por:

$$E = \frac{e_2 - e_1}{S_2 - S_1} \quad (3.4)$$

onde $(e_2 - e_1)$ representa a diferença de extensões nominais entre dois instantes e $(S_2 - S_1)[MPa]$ a respectiva diferença entre os valores correspondentes de tensão nominal. Uma vez que a norma utilizada não estabelece instantes para os quais este cálculo deve ser realizado, de modo a garantir que o módulo de elasticidade é determinado na região linear da curva, considerou-se para efeito de cálculo o intervalo $e = [0,0005 ; 0,0025]$ em todos os ensaios.

As curvas tensão-extensão, bem como todos os pontos particulares calculados, correspondem a valores nominais, uma vez que os valores de tensão e extensão são calculados com base nos valores iniciais (de secção e de altura, respectivamente). Para obter curvas e valores verdadeiros, a tensão e a extensão em cada ponto devem ser calculados a partir dos valores de secção e altura a cada instante.

Em geral, as curvas resultantes dos ensaios de compressão apresentam uma região inicial com curvatura, ilustrada na figura 3-18. Esta região não representa o comportamento do material, resultando da adaptação que ocorre entre o provete e os pratos de compressão. Na tentativa de minimizar este efeito, é aplicada uma pré-carga no início dos ensaios. A pré-carga consiste em carregar o provete até um determinado nível de tensão e, quando esse ponto é atingido, definir os valores de força e deslocamento como zero, de forma a que os registos se iniciem do zero a partir desse ponto. No entanto, este valor de carga não deve ser muito elevado de modo a não interferir com a caracterização do comportamento do material e, portanto, pode não ser suficiente para corrigir o efeito da adaptação. Prevendo esta ocorrência, a norma ASTM D695 expõe o procedimento que deve ser aplicado para a correcção da curva. Assim, e tendo em conta que a pré-carga de 5 N aplicada mostrou ser insuficiente, a seguinte correcção foi aplicada às curvas obtidas dos ensaios: tomando como referência a região linear da curva, foi traçada uma recta de continuação desta região até intersectar o eixo das abcissas; o ponto obtido desta intersecção passa a ser o ponto de zero extensão e, assim sendo, toda a curva é transladada de forma a que este ponto coincida com a origem.

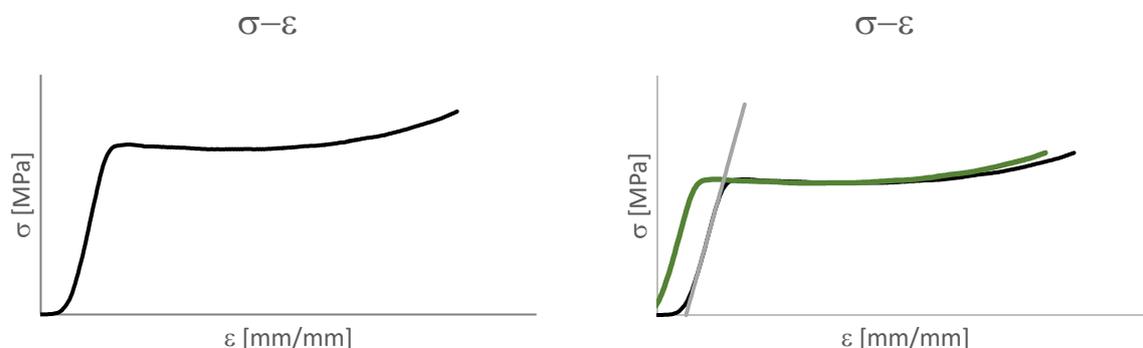


Figura 3-18 Ilustração da correcção aplicada às curvas de compressão devido ao início não-linear: curva não corrigida (esquerda); correcção e curva corrigida (direita)

3.3.2. Ensaio de tracção

O procedimento adoptado na realização dos ensaios de tracção uniaxial foi baseado na norma ASTM D638, com provetes do tipo I, ilustrados na figura 3-19, com 165 mm de comprimento total, 3,2 mm de espessura e uma zona de referência com largura de 13 mm e comprimento de 50 mm. As condições de construção destes provetes foram as já descritas para os provetes de compressão uniaxial.

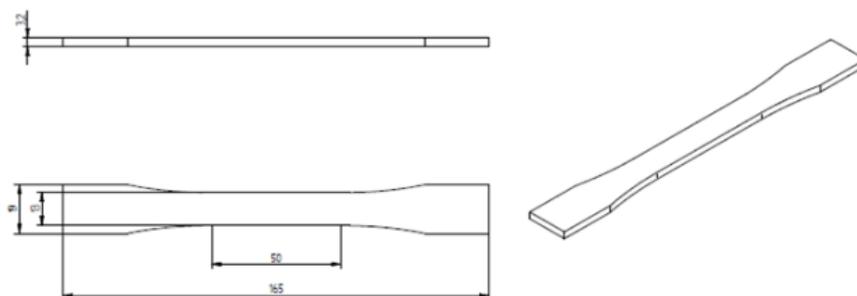


Figura 3-19 Esquema dos provetes de tracção ensaiados

Para cada grupo de variáveis em estudo (sintetizadas na tabela 3-1) foram ensaiados cinco provetes com velocidade constante de $v=5$ mm/min, conforme recomendado na norma. Estes ensaios foram realizados com recurso a dois extensómetros: um extensómetro longitudinal (*Instron 2630-111*), para quantificar a extensão nominal da região de referência, e um extensómetro transversal (*Instron W-E404-E*), para quantificar a extensão nominal segundo a largura da mesma região (ver figura 3-20). Estes ensaios foram realizados até à ocorrência de fractura de cada provete.

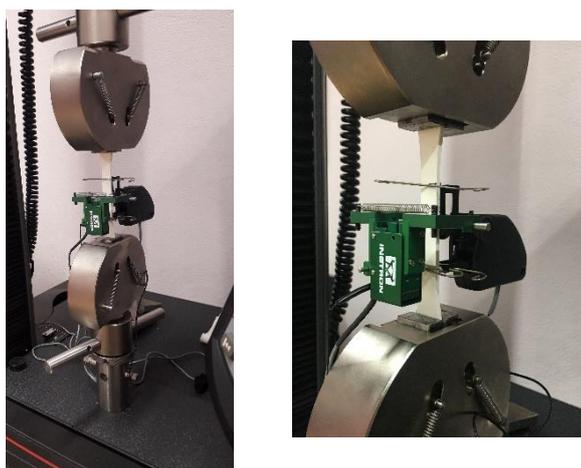


Figura 3-20 Montagem dos extensómetros

As dimensões iniciais da zona de referência de cada provete foram inseridas no software de comunicação com a máquina de ensaios, permitindo obter os registos não só os registos de força e de deslocamento da amarra de tracção, mas também os valores tensão nominal-extensão nominal do comprimento de referência.

Tal como para o ensaio de compressão uniaxial, também no ensaio de tração uniaxial, a norma refere como instantes de interessa para quantificar propriedades relativas ao comportamento mecânico, o ponto de cedência, o ponto de força/tensão máxima e o ponto de fractura. Dá ainda indicações sobre o modo de quantificar o coeficiente de Poisson na região linear inicial da curva tensão-extensão nominal obtida no ensaio, a partir do quociente entre a extensão segundo a largura e a extensão longitudinal da zona de referência:

$$\nu = \frac{d_{e_w}}{d_{e_l}} \quad (3.5)$$

onde e_w representa a extensão transversal e e_l a extensão longitudinal. Tal como no caso do módulo de elasticidade, a norma não estabelece o intervalo de extensões no qual o coeficiente de Poisson deve ser determinado, tendo-se, neste trabalho, estabelecido o mesmo intervalo para o qual foi determinado o módulo de elasticidade, ou seja, $e = [0,0005 ; 0,0025]$.

3.3.3. Ensaio cíclicos

Para além dos ensaios descritos anteriormente, foram também realizados ensaios cíclicos para ambos os tipos de carregamento. Tanto no caso dos ensaios de tração como dos ensaios de compressão, foram ensaiados dois provetes para cada combinação de percentagem de enchimento e padrão de enchimento (num total de 18 provetes de compressão e 18 provetes de tração). Os ensaios cíclicos exigem uma programação específica, uma vez que é necessário definir as condições de cada ciclo de carga e descarga. Os limites de carga e descarga podem ser definidos, por exemplo, em função de uma força ou tensão aplicada ou em função de um deslocamento ou extensão.

Os ensaios cíclicos de compressão foram realizados com a mesma velocidade dos anteriores ensaios de compressão ($v=1,3$ mm/min) e com as mesmas condições de lubrificação (fita de *teflon*), num total de trinta ciclos até aos 3 mm de deformação. Esta velocidade de deslocamento corresponde a uma velocidade de deformação baixa mas não constante.

Um dos interesses da realização deste tipo de ensaio é a determinação das partes permanentes e elásticas da extensão total verificada em cada ponto. Assim, importa tentar captar com maior refinamento o comportamento do material até ao ponto de cedência. Os ensaios de compressão anteriores permitiram concluir em que nível de deformação se situava, em média, o ponto de cedência dos diferentes tipos de provetes. Com essa informação em mente, dos trinta ciclos definidos foram definidos vinte até um nível de deformação que se julgou ser necessário para incluir o ponto de cedência (até aos 1,5 mm) e os restantes dez ciclos a partir desse ponto até aos 3 mm de deformação. O primeiro ciclo incluiu uma pré-carga de 5 N, de forma semelhante ao que tinha sido estabelecido nos ensaios de compressão anteriores. Nos primeiros vinte ciclos, o controlo do limite máximo de carregamento foi definido em deslocamento, isto é, foi definido que o provete devia ser progressivamente carregamento até uma deformação total de 1,5 mm (que correspondem a uma extensão nominal de $e=0,1$) em incrementos de 0,075 mm ($\Delta e=0,005$) em cada ciclo. O controlo do limite mínimo do carregamento foi também definido em descolamento, estabelecendo que os provetes deveriam ser descarregados até se atingir um deslocamento de 0 mm. Para estes vinte ciclos, os primeiros quatro foram realizados com

um período de aquisição de 0,1 s (isto é, foram registados dez pontos de força-deslocamento por segundo) e os ciclos de cinco a vinte foram realizados com um período de aquisição de 0,2 s (ou seja, cinco pontos por segundo). Os restantes dez ciclos foram realizados com incrementos de deformação de 0,15 mm ($\Delta e=0,01$), até uma deformação de 3 mm ($e=0,2$). Nestes ciclos, o período de aquisição foi de 0,3 s.

No caso dos ensaios cíclicos de tracção, os provetes ensaiados anteriormente revelaram níveis de deformação bastante díspares entre si, consoante as condições de preenchimento. Assim, ao contrário dos ensaios cíclicos de compressão em que todos os 18 provetes foram ensaiados com a mesma programação, para os provetes de tracção foram definidos 4 métodos distintos e os provetes foram ensaiados de acordo com o que melhor se adaptava ao comportamento apresentado anteriormente. Mais uma vez, os limites foram definidos de forma a tentar definir com alguma precisão a região até à cedência. Nos casos em que os provetes partiram prematuramente, provavelmente antes de atingirem a cedência, os limites foram definidos tendo em consideração o ponto de fractura.

A velocidade utilizada nos ensaios de tracção ($v=5$ mm/min) não foi mantida para o caso dos ensaios cíclicos, tendo estes sido realizados com uma velocidade $v=1$ mm/min. Esta redução foi aplicada com o objectivo de facilitar o processo de aceleração e desaceleração da máquina nos extremos de cada ciclo. Em todos os métodos definidos, foi imposta uma pré-carga de 2 N. Outra definição comum a todos os métodos foi o limite inferior de cada ciclo, ou seja, todos os ciclos terminavam (e o ciclo seguinte era iniciado) quando a força medida era 0 N, o que corresponde a “descarregar” o provete. Neste caso, o controlo do limite inferior de cada ciclo não foi feito em deslocamento como no caso dos ensaios de compressão uma vez que impor um deslocamento (ou uma extensão) de zero poderia induzir no provete uma carga compressiva, quando o pretendido é apenas que o provete seja descarregado. Assim, os métodos definidos diferiam na deformação máxima imposta e nos incrementos aplicados até esta deformação da seguinte forma:

- 10 ciclos com incrementos de extensão de $\Delta e=0,001$, conduzindo a um total de $e=0,01$ (aplicado nos provetes de 50% de enchimento com orientações 0° e 90° e nos provetes com 75% de enchimento e orientação de 0°);
- 15 ciclos com incrementos de extensão de $\Delta e=0,001$, até uma extensão total $e=0,015$ (aplicado nos provetes com 75% de enchimento e orientação de 9° e nos provetes com 100% de enchimento e orientação de 90°);
- 13 ciclos com incrementos de extensão de $\Delta e=0,002$, conduzindo a uma extensão $e=0,026$ (aplicado nos provetes com 50% de enchimento e orientação $\pm 45^\circ$ e nos provetes com 75% de preenchimento e orientação $\pm 45^\circ$);
- 15 ciclos com incrementos de extensão de $\Delta e=0,002$, num total de $e=0,034$ (aplicado nos provetes com 100% e orientações de 0° e $\pm 45^\circ$).

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos no decorrer deste trabalho. Começa por apresentar-se uma discussão relativa aos resultados das medições de densidades realizadas aos filamentos antes e após extrusão, bem como a todos os provetes de compressão. Faz-se também referência aos volumes determinados e às medições realizadas.

De seguida, analisa-se o comportamento mecânico dos provetes de compressão e de tracção com percentagem de enchimento de 100% e diferentes direcções de impressão através dos resultados experimentais de ensaio de tracção e compressão uniaxial. Apresentam-se linhas gerais de comparação entre as curvas tensão-extensão nominais e as respetivas curvas verdadeiras. Efectua-se uma análise mais detalhada do comportamento mecânico destas estruturas até à tensão máxima/cedência das curvas tensão-extensão obtidas e complementa-se este estudo através da realização de ensaios cíclicos.

Posteriormente, analisam-se os resultados dos ensaios de compressão e de tracção dos provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100%. Efectua-se uma análise comparativa dos valores obtidos para cada uma das percentagens de enchimento e direcções de impressão e, no caso dos provetes de compressão, efectua-se uma correcção das tensões registadas com base no cálculo de uma área equivalente.

4.1. Dimensões e densidades

Antes de se proceder à medição experimental de cada uma das estruturas impressas, efectuou-se o estudo da densidade do filamento de PLA antes e depois de extrudido com o objetivo de as comparar com as densidades das estruturas impressas. A medição experimental das densidades foi efectuada utilizando a balança de precisão e o kit de densidades descritos no capítulo anterior (secção 3.2.2)

As Tabelas 4-1 e 4-2 sintetizam os resultados obtidos relativos às densidades do filamento de PLA antes e depois de extrudido, respectivamente.

Tabela 4-1 Medições da densidade do filamento antes de ser extrudido

Antes da extrusão			
Densidade [g/cm³]	1,257	1,255	1,257
% Densidade teórica	101,37%	101,21%	101,37%
Densidade média [g/cm³]		1,256	
Variação em relação à teórica		1,29%	

Tabela 4-2 Medições da densidade do filamento depois de ser extrudido

Depois da extrusão							
Densidade [g/cm³]	1,213	1,201	1,283	1,199	1,209	1,268	1,205
% Densidade teórica	97,82%	96,85%	103,47%	96,69%	97,50%	102,26%	97,18%
Densidade média [g/cm³]	1,225						
Varição em relação à teórica	-1,18%						

O valor de densidade tomado como referência teórica para as comparações realizadas nas tabelas anteriores foi o valor apresentado na ficha técnica do PLA fornecido pela *Ultimaker*, ou seja, $\rho = 1,24 \text{ g/cm}^3$. Conclui-se então que antes da extrusão o filamento apresenta uma densidade ligeiramente superior ao valor tabelado e que o processo de extrusão reduz ligeiramente a densidade.

A determinação das densidades de cada um dos provetes de compressão foi efectuada através de três medições que permitiram determinar o valor médio da densidade de cada um e, posteriormente, calcular a densidade média de cada percentagem e orientação de impressão. As Tabelas 4-3 a 4-11 sintetizam os resultados destas medições.

Tabela 4-3 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de 0°

A (50%,0°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,679	0,682	0,674	0,679	0,678	0,678	0,689	0,677	0,66
	0,683	0,684	0,675	0,687	0,678	0,673	0,689	0,676	0,662
	0,679	0,685	0,677	0,682	0,678	0,677	0,693	0,677	0,662
Média das medições	0,68	0,684	0,675	0,683	0,678	0,676	0,69	0,677	0,661
Densidade média	0,678								

Tabela 4-4 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de 90°

B (50%,90°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,709	0,709	0,699	0,708	0,704	0,698	0,712	0,704	0,687
	0,71	0,711	0,699	0,709	0,705	0,7	0,715	0,706	0,687
	0,708	0,713	0,7	0,71	0,703	0,698	0,715	0,705	0,687
Média das medições	0,709	0,711	0,699	0,709	0,704	0,699	0,714	0,705	0,687
Densidade média	0,704								

Tabela 4-5 Medições da densidade dos provetes com 50% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$

C (50%,$\pm 45^\circ$) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,719	0,731	0,717	0,719	0,713	0,71	0,725	0,721	0,697
	0,721	0,723	0,716	0,722	0,713	0,711	0,727	0,715	0,697
	0,719	0,772	0,715	0,722	0,713	0,712	0,727	0,718	0,697
Média das medições	0,72	0,742	0,716	0,721	0,713	0,711	0,726	0,718	0,697
Densidade média	0,718								

Tabela 4-6 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de 0°

D (75%,0°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,945	0,948	0,933	0,941	0,93	0,939	0,955	0,938	0,916
	0,943	0,95	0,934	0,94	0,935	0,938	0,956	0,942	0,913
	0,944	0,949	0,935	0,944	0,934	0,937	0,951	0,937	0,912
Média das medições	0,944	0,949	0,934	0,942	0,933	0,938	0,954	0,939	0,914
Densidade média	0,939								

Tabela 4-7 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de 90°

E (75%,90°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,939	0,941	0,932	0,942	0,939	0,935	0,95	0,944	0,928
	0,944	0,942	0,935	0,94	0,937	0,934	0,951	0,945	0,926
	0,939	0,946	0,934	0,942	0,936	0,935	0,95	0,947	0,92
Média das medições	0,941	0,943	0,934	0,941	0,937	0,935	0,95	0,945	0,925
Densidade média	0,939								

Tabela 4-8 Medições da densidade dos provetes com 75% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$

F (75%,$\pm 45^\circ$) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,928	0,936	0,919	0,929	0,926	0,921	0,938	0,928	0,905
	0,949	0,935	0,925	0,93	0,935	0,918	0,942	0,927	0,906
	0,93	0,944	0,922	0,931	0,927	0,924	0,939	0,925	0,908
Média das medições	0,936	0,938	0,922	0,93	0,929	0,921	0,94	0,927	0,906
Densidade média	0,928								

Tabela 4-9 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de 0°

G (100%,0°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1,236	1,233	1,237	1,235	1,235	1,236	1,236	1,235	-
	1,234	1,237	1,237	1,236	1,236	1,236	1,237	1,238	-
	1,235	1,234	1,234	1,235	1,236	1,238	1,237	1,236	-
Média das medições	1,235	1,235	1,236	1,235	1,236	1,236	1,237	1,236	
Densidade média	1,236								

Tabela 4-10 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de 90°

H (100%,90°) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1,24	1,24	1,24	1,24	1,238	1,236	1,242	1,24	-
	1,242	1,239	1,238	1,24	1,238	1,239	1,243	1,241	-
	1,24	1,241	1,238	1,241	1,241	1,24	1,244	1,242	-
Média das medições	1,241	1,24	1,239	1,24	1,239	1,238	1,243	1,241	
Densidade média	1,240								

Tabela 4-11 Medições da densidade dos provetes com 100% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$

I (100%, $\pm 45^\circ$) [g/cm ³]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1,241	1,239	1,237	1,238	1,236	1,236	1,236	1,238	-
	1,239	1,239	1,236	1,239	1,237	1,238	1,236	1,238	-
	1,238	1,24	1,237	1,238	1,238	1,236	1,237	1,238	-
Média das medições	1,239	1,239	1,237	1,238	1,237	1,237	1,236	1,238	
Densidade média	1,238								

Para auxiliar a leitura de algumas destas tabelas, representaram-se graficamente na figura 4-1 os valores médios da densidade de cada um dos provetes com 100% de enchimento (aqui denominados de “densos”) nas diferentes direcções de impressão e o respectivo valor médio. Encontram-se também representados os valores das densidades do fio depois de extrudido e a média correspondente.

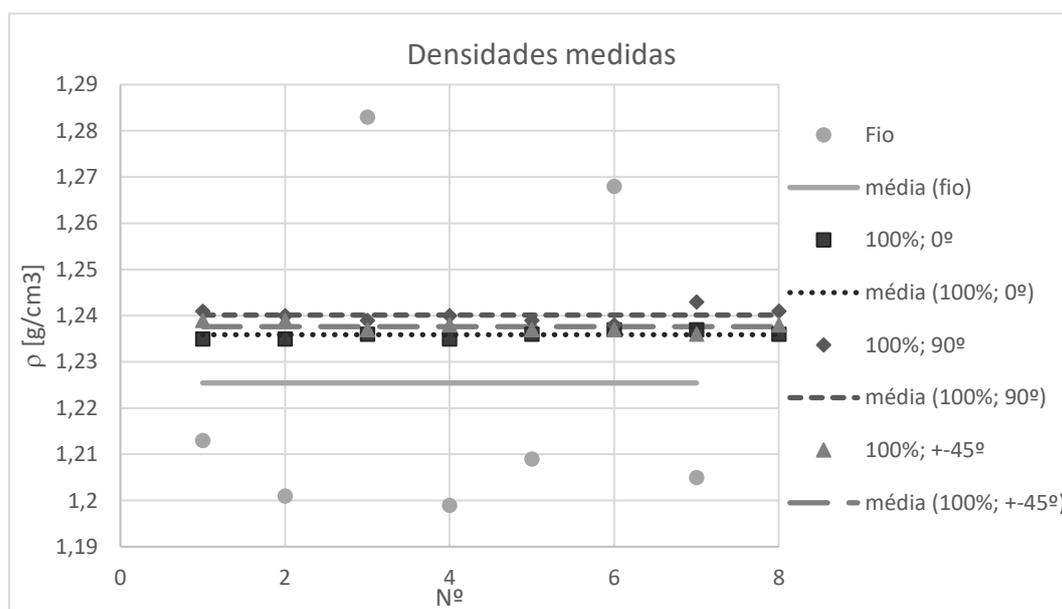


Figura 4-1 Representação gráfica das medidas do filamento depois de extrudido e dos provetes com 100% de enchimento de todas as orientações

A análise destes resultados permite concluir que a densidade dos provetes densos apresenta valores muito próximos da densidade teórica do PLA, referida anteriormente. A medição experimental da densidade do fio de PLA depois de extrudido apresentou algumas dificuldades (possivelmente devidas ao tamanho reduzido da amostra (visível na figura 3-13) e à inerente dificuldade de eliminação de eventuais bolhas de ar), que são evidentes na dispersão dos resultados. Por este motivo optou-se por tomar como valor de referência, para o cálculo das densidades relativas, em cada uma das orientações, o valor da densidade obtido das medições dos respectivos provetes densos. A Tabela 4-

12 mostra as densidades relativas médias dos provetes de compressão de cada uma das percentagens de enchimento e orientações de impressão em relação aos valores de referência estabelecidos.

Tabela 4-12 Densidades relativas dos provetes em relação ao valor de referência para cada orientação

Densidades relativas [g/cm³]			
	0°	90°	±45°
Densidade (referência)	1,236	1,240	1,238
100%	1	1	1
75%	0,760	0,757	0,750
50%	0,549	0,568	0,580

A análise destes resultados permite concluir que a densidade dos provetes impressos com 75% de preenchimento corresponde aproximadamente a 75% do valor da densidade dos provetes densos, enquanto a densidade dos provetes impressos com 50% de preenchimento é ligeiramente superior a 50% do valor da densidade dos provetes densos.

No caso dos provetes de compressão, os procedimentos realizados para a determinação da densidade de cada um deles forneceram dados que permitiram também calcular o seu volume, conforme descrito na secção 3.2.2 (equação (3.2)). O resultado destes cálculos encontra-se sintetizado na Tabela 4-13.

Tabela 4-13 Volume de cada um dos provetes de compressão

Volumes [mm³]									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1534,03	1533,22	1527,77	1541,73	1543,3	1530,45	1511,28	1518,04	1518,64
2	1529,72	1529,61	1486,58	1530,89	1537,81	1529,72	1501,58	1510,54	1508,84
3	1532,29	1539,04	1528,34	1539,39	1542,8	1543,4	1508,3	1517,67	1518,47
4	1534,8	1540,35	1536,44	1544,68	1548,75	1544,87	1520,58	1527,21	1526,1
5	1528,48	1533,62	1529,11	1534,61	1537,38	1532,03	1506,36	1516,43	1516,73
6	1532,83	1536,37	1532,49	1540,29	1543,37	1540,52	1530,59	1520,55	1520,52
7	1531,76	1531,35	1529,92	1532,97	1536,14	1534,67	1523,16	1516,73	1522,69
8	1524,66	1522,21	1511,95	1526,54	1526,07	1531,16	1497,43	1505,76	1505,66
9	1527,24	1524,45	1523,22	1537,92	1524,39	1534,57	-	-	-
Média	1530,65	1532,25	1522,87	1536,56	1537,78	1535,71	1512,41	1516,62	1517,21
Desvio-padrão	3,362	6,133	15,23	5,763	8,113	5,77	11,397	6,388	6,838

Durante a realização dos ensaios mecânicos, a máquina de ensaios transmite os valores de força e deslocamento registados ao *software* de aquisição de dados. Para que este (ou o utilizador, num tratamento posterior) possa calcular os correspondentes valores de tensão e de extensão nominais, é necessário conhecer o valor inicial da área da secção resistente de cada provete. Para tal, efectou-se a medição dos lados das secções de todos os provetes com recurso a um paquímetro. No caso dos provetes de compressão, foram realizadas três medições de cada um dos lados da secção, tendo estas medições sido efectuadas ao longo da altura do provete. Da observação dos valores medidos, verificou-se que uma das dimensões foi reiteradamente superior ao valor nominal estabelecido para a impressão, sendo esta diferença aproximadamente constante em todos os casos. Esta observação sugere que esta diferença entre o valor medido e o valor de projeto se deva à zona de contacto do provete com a camada de base (*raft*), ou seja, que exista uma “camada extra” responsável por manter o provete ligado e que permanece no provete ao invés de permanecer na camada de base, contribuindo assim para o aumento de 0,3 mm de um dos lados da secção de cada provete.

Os valores experimentais relativos ao volume e à área da secção de cada um dos provetes permitiu determinar uma altura média de cada provete depois de impresso. Os valores calculados para esta dimensão revelaram algum afastamento da altura definida em projecto (15 mm). Para aferir estes resultados procedeu-se à medição com o paquímetro da altura de cada um dos provetes, tendo sido novamente efectuadas três medições, a partir das quais se calculou o valor médio. A figura 4-2 mostra um provete, onde é possível observar alguns desvios relativamente à forma paralelepípedica de projecto (identificada pela linha preta a tracejado), como por exemplo o alargamento indesejado dos cantos. As zonas que continham estes defeitos foram evitadas aquando das medições, de forma a não prejudicar o valor das mesmas (uma vez que estes defeitos conduzem, naquelas zonas, à medição de valores superiores aos reais).

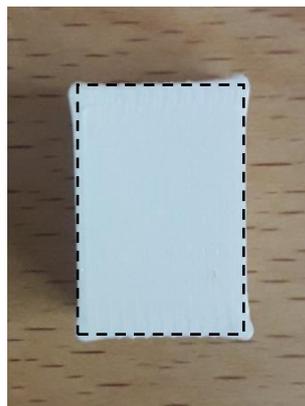


Figura 4-2 Desvios em relação à geometria pretendida

A diferença de valores obtidos para as alturas determinadas a partir do volume pode ter origem tanto na acumulação de erros associados às medições experimentais, bem como na forma real dos provetes, uma vez que o cálculo é realizado considerando-os paralelepípedos perfeitos quando, na verdade, como já foi referido, em duas das suas faces as arestas não são vivas, apresentando cantos arredondados. Outras das irregularidades verificadas nos provetes impressos podem também dever-se à existência de um ponto mais saliente em cada camada, correspondente ao seu início de impressão, ou ser consequência do tipo de preenchimento, sendo esta ocorrência mais evidente no caso dos provetes com preenchimento a $\pm 45^\circ$, como ilustra a figura 4-3. Constata-se que o cálculo da altura a partir do volume e da área da secção conduz a valores de altura inferiores ao valor estabelecido enquanto, pelo contrário, os valores de altura medidos com o paquímetro resultam em valores superiores ao valor estabelecido.

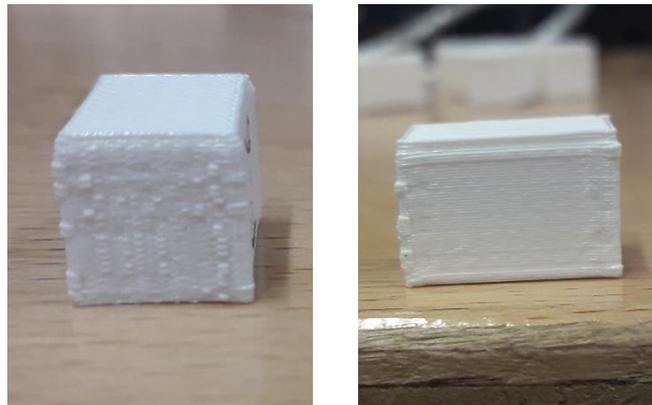


Figura 4-3 Irregularidades da superfície num provete com orientação de impressão de $\pm 45^\circ$

Através da análise destes valores conclui-se que, no geral, os valores de altura calculados a partir do volume conduzem a erros menores. Para além disso, as medições com o paquímetro são muito influenciadas pelas irregularidades da geometria das suas faces, ainda que se tente que estas sejam evitadas durante a execução da medida. Assim, optou-se por tomar em consideração para altura dos provetes o valor calculado a partir do volume e da área de secção.

A área inicial dos provetes de tracção foi igualmente medida. Neste caso, foram também realizadas três medições em cada um dos lados da secção, no entanto, estas não foram distribuídas ao longo de todo o comprimento do provete, mas apenas ao longo do comprimento da região de referência. Este comprimento de referência (50 mm) foi previamente marcado na zona central de cada um dos provetes.

Para além do procedimento de pesagem seguido inicialmente, todos os provetes de compressão voltaram a ser pesados na balança após serem ensaiados a fim de determinar a densidade depois de comprimidos. Novamente, a densidade de cada provete foi determinada (através da média de três medições), permitindo também a determinação do seu volume após o ensaio. Os resultados destas medições e dos cálculos consequentes encontram-se na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 Análise da variação de volume dos provetes de compressão

		1	2	3	4	5
A	V_i	1534,03	1529,72	1532,29	1534,80	1528,48
	V_f	1,408632	1,407022	1,410149	1,363492	1,467938
	ΔV	-8,175%	-8,021%	-7,971%	-11,162%	-3,961%
B	V_i	1533,22	1529,61	1539,04	1540,35	1533,62
	V_f	1,098457	1,101587	1,324619	1,098022	1,093094
	ΔV	-28,356%	-27,982%	-13,932%	-28,716%	-28,725%
C	V_i	1527,77	1486,58	1528,34	1536,44	1529,11
	V_f	1,284257	1,282904	1,391868	1,388401	1,37854
	ΔV	-15,939%	-13,701%	-8,930%	-9,635%	-9,847%
D	V_i	1541,73	1530,89	1539,39	1544,68	1534,61
	V_f	1,445766	1,446033	1,413912	1,414949	1,420637
	ΔV	-6,224%	-5,543%	-8,151%	-8,398%	-7,426%
E	V_i	1543,30	1537,81	1542,80	1548,75	1537,38
	V_f	1,195386	1,19649	1,188159	1,193211	1,181366
	ΔV	-22,543%	-22,195%	-22,987%	-22,957%	-23,157%
F	V_i	1530,45	1529,72	1543,40	1544,87	1532,03
	V_f	1,280307	1,27676	1,275857	1,267826	1,272778
	ΔV	-16,345%	-16,536%	-17,335%	-17,933%	-16,922%
G	V_i	1511,28	1501,58	1508,30	1520,58	1506,36
	V_f	1,508227	1,499695	1,507825	1,518231	1,508795
	ΔV	-0,202%	-0,125%	-0,032%	-0,155%	0,162%
H	V_i	1518,04	1510,54	1517,67	1527,21	1516,43
	V_f	1,507968	1,503016	1,505157	1,514894	1,504689
	ΔV	-0,663%	-0,498%	-0,825%	-0,806%	-0,774%
I	V_i	1518,64	1508,84	1518,47	1526,10	1516,73
	V_f	1,515955	1,503743	1,508996	1,519736	1,509163
	ΔV	-0,177%	-0,338%	-0,624%	-0,417%	-0,499%

Da análise destes resultados conclui-se que, em todos os casos, o volume dos provetes depois do ensaio de compressão é menor do que o inicial, conforme se esperava, tendo em conta que alguns deles são construídos com percentagens de enchimento inferiores a 100%. Para além disso, as características do processo de fabrico em questão conduzem inevitavelmente a poros entre os filamentos depositados. No entanto, no caso dos provetes com percentagem de enchimento de 100%, a variação do volume medido revelou-se pouco significativa.

4.2. Provetes com 100% de enchimento

O comportamento dos provetes cuja percentagem de enchimento foi definida como 100% é aquele que mais se aproximará do comportamento intrínseco do material uma vez que é o que mais se aproximará de uma estrutura completamente densa. A análise efectuada acima relativamente aos volumes dos provetes de compressão após o ensaio permitiu concluir que o volume dos provetes com 100% de enchimento não sofre grandes alterações. Neste contexto, e com consciência que se trata de uma aproximação, determinaram-se os valores verdadeiros de tensão e de extensão destes provetes, com base na condição de incompressibilidade, ou seja, considerando que a deformação ocorre a volume constante.

Deste modo, os valores verdadeiros de tensão e extensão foram obtidos, no caso dos provetes com percentagem de enchimento de 100%, a partir dos respectivos valores nominais através de:

$$\sigma = S (e + 1) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \ln (e + 1) \quad (4.2)$$

onde σ e ε são os valores verdadeiros de tensão e extensão, respectivamente, e S e e são os valores nominais de tensão e extensão, respectivamente. No caso da compressão, a extensão nominal e assume um valor negativo, portanto, e uma vez que se pretende o valor absoluto desta variável, as expressões apresentadas acima devem ser adaptadas, resultando em:

$$\sigma = S (1 - e) \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = -\ln(1 - e) = \ln\left(\frac{1}{1 - e}\right) \quad (4.4)$$

Apresentam-se abaixo os resultados dos ensaios experimentais de tracção relativos às curvas de tensão-extensão nominais e às principais propriedades mecânicas obtidas em cada ensaio, que permitirão não só efectuar a comparação entre os valores verdadeiros e os nominais no caso dos provetes densos, mas também comparar as curvas nominais de tensão-extensão e as propriedades retiradas destes ensaios relativas aos provetes com percentagens de enchimento de 50% e 75%, que serão apresentados posteriormente na secção 4.3.1.

Importa ainda referir que, devido ao volume disponível para medições e pesagens da balança, não foi possível realizar a mesma análise de variação do volume antes e após ensaio para o caso dos provetes de tracção. No entanto, as conclusões retiradas a partir dos provetes de compressão foram consideradas também na análise dos ensaios de tracção uniaxial, permitindo obter as curvas tensão-extensão verdadeiras dos provetes densos a partir dos valores nominais, considerando o volume constante durante cada ensaio.

De seguida, apresentam-se os resultados dos ensaios de tracção e de compressão uniaxiais, incluindo uma comparação entre os valores e as curvas nominais com os valores e curvas verdadeiras. Por fim, serão comparados os comportamentos das estruturas impressas à tracção e à compressão, tendo por base as curvas verdadeiras de cada um destes tipos de solicitação.

4.2.1. Ensaio de tracção uniaxial

Na figura 4-4 estão representadas as curvas nominais de tensão-extensão dos provetes de tracção ensaiados para cada uma das três direcções com 100% de percentagem de enchimento. No Anexo A1, são apresentados os valores de tensão e extensão máximos, bem como na fractura. São também apresentados os respectivos valores do módulo de elasticidade, E , e do coeficiente de Poisson, ν , determinados de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Os valores apresentados correspondem a cada um dos cinco provetes de cada uma das condições de impressão, a média dos resultados e o respectivo desvio-padrão. Na figura 4-5 encontram-se representados os valores médios, para cada orientação, das propriedades referidas anteriormente, bem como o respectivo desvio-padrão.

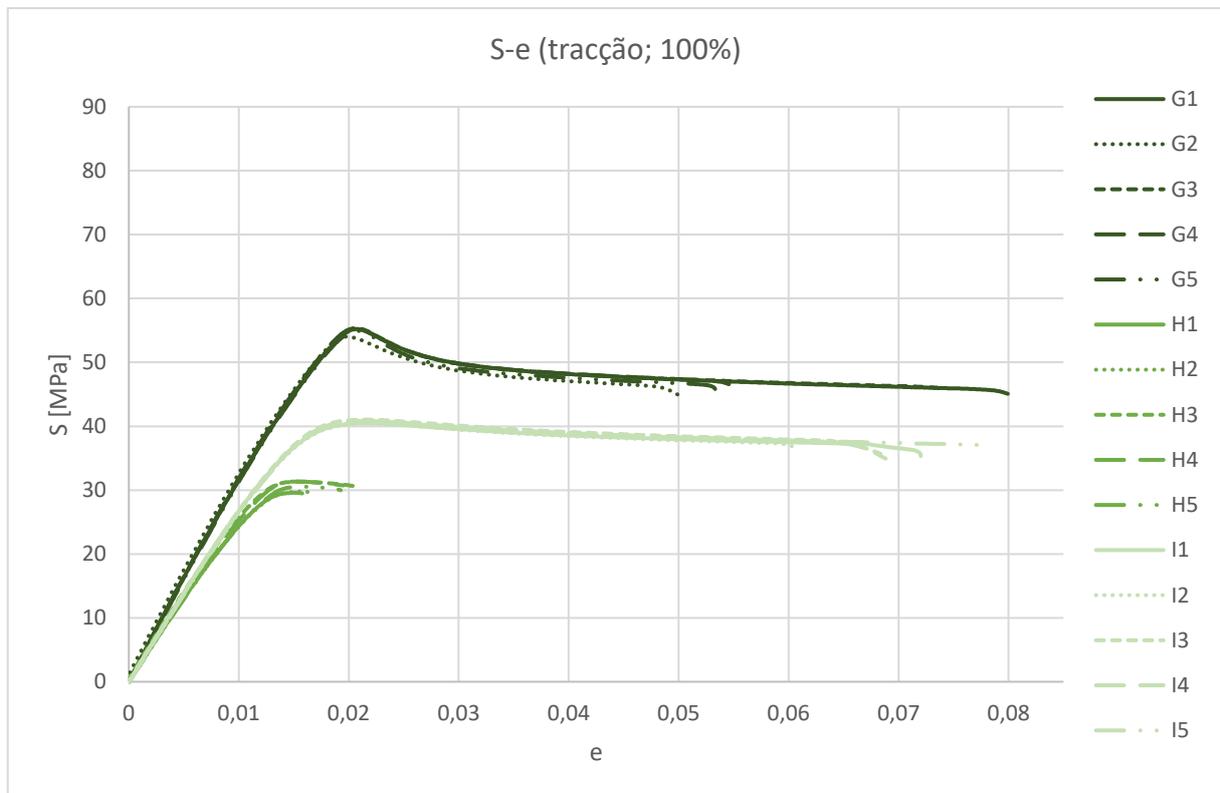
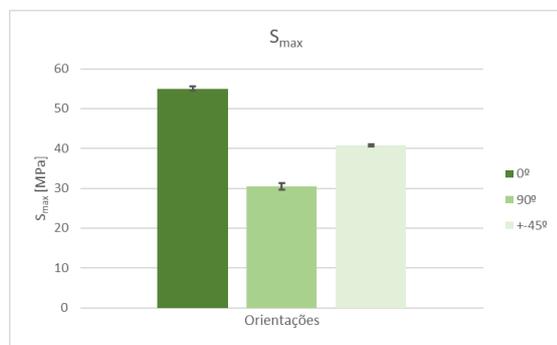
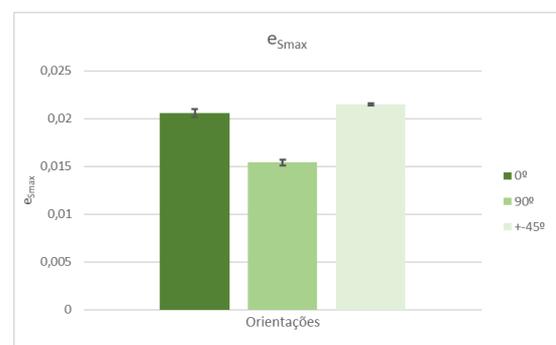


Figura 4-4 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento



(a)



(b)

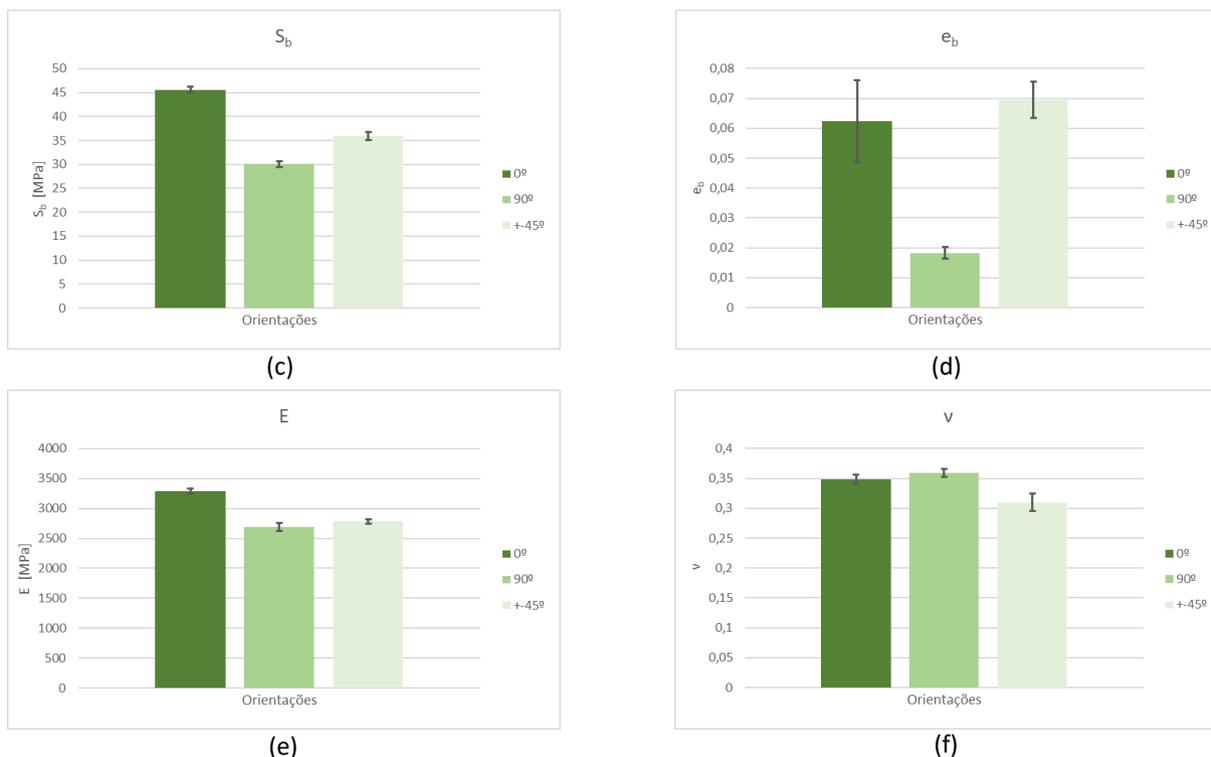


Figura 4-5 Representação gráfica da variação das propriedades nominais de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson

Na figura 4-6 encontram-se representadas as curvas verdadeiras de tensão-extensão dos provetes de tracção ensaiados, para cada uma das direcções, com 100% de percentagem de enchimento. No Anexo A2 encontram-se os correspondentes valores verdadeiros das mesmas propriedades anteriormente expostas para os valores nominais. A figura 4-7 representa novamente a média dos valores de cada orientação e o respectivo desvio-padrão.

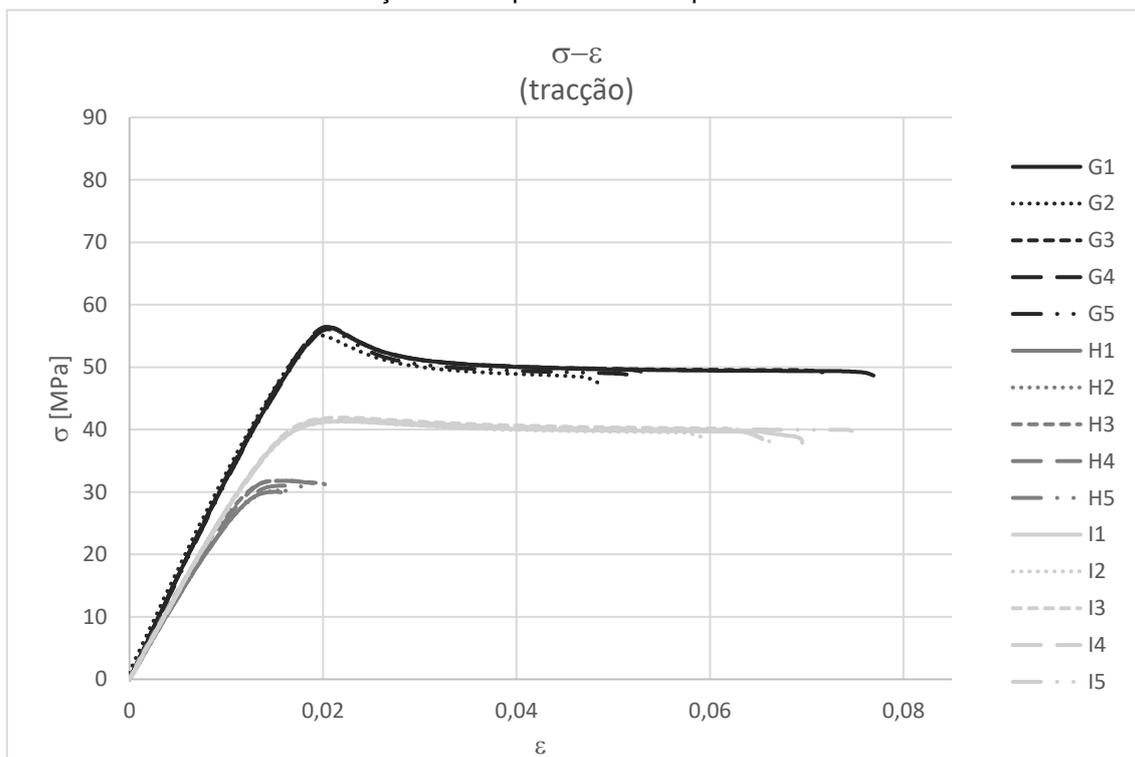


Figura 4-6 Curvas verdadeiras tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento

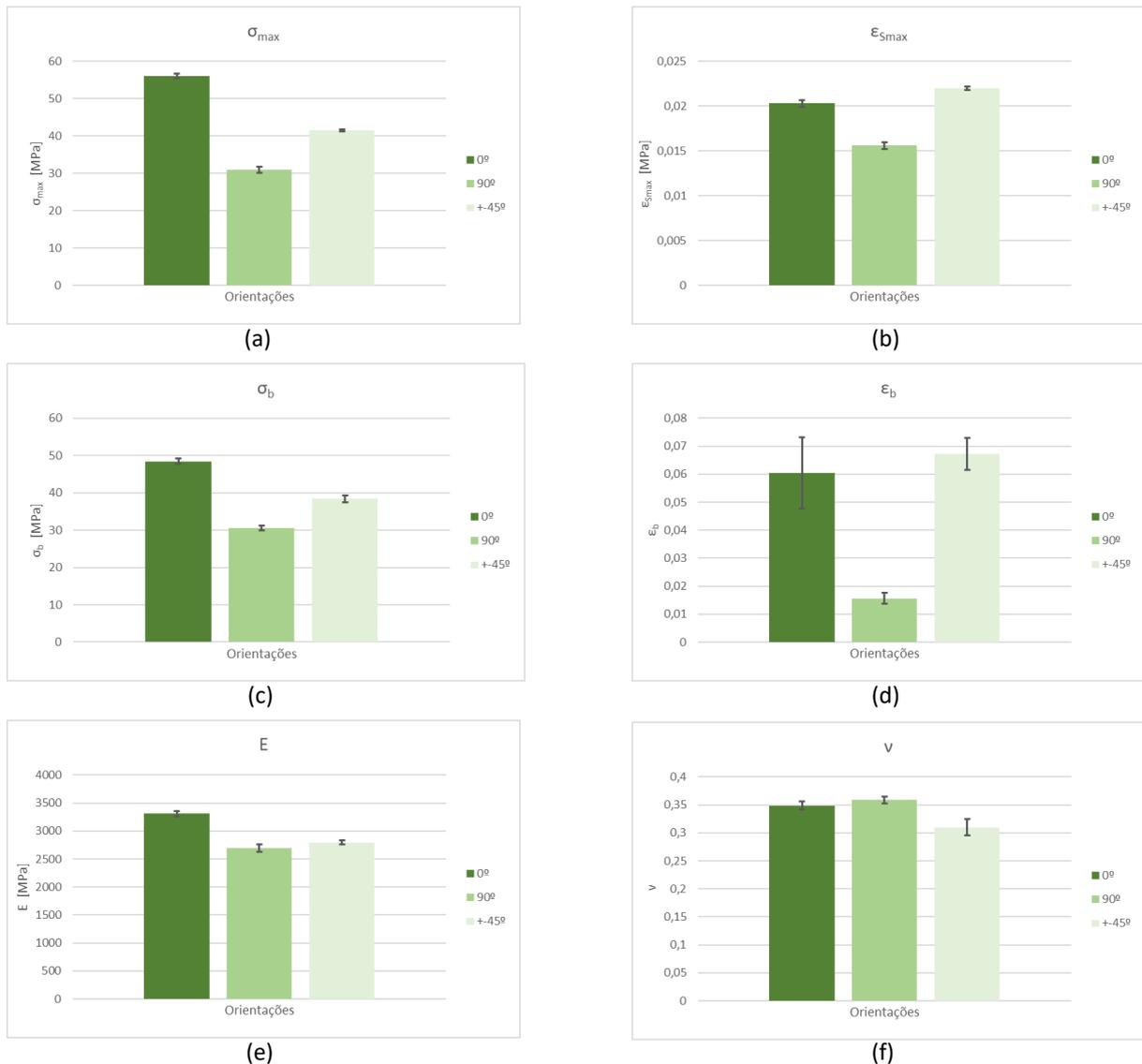


Figura 4-7 Representação gráfica da variação das propriedades verdadeiras de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson

A observação das figuras 4-4 e 4-6 permite concluir não só que a repetibilidade entre provetes de cada tipo é elevada, como também que a forma das curvas nominais é bastante semelhante à forma das curvas verdadeiras, facto que é corroborado pela semelhança dos valores apresentados nas tabelas dos Anexos A1 e A2. Os baixos níveis de deformação atingidos nestes ensaios contribuem para a semelhança entre os valores nominais e verdadeiros.

Estas curvas apresentam uma forma semelhante à que é habitualmente encontrada na bibliografia, sendo possível a distinção de diversas regiões das curvas já referenciadas em trabalhos anteriores e expostas anteriormente. Por exemplo, em [36] apresenta-se uma análise do comportamento mecânico de polímeros vítreos (*glassy polymers*) na qual foram identificadas diversas fases do comportamento mecânico destes polímeros.

Observando a figura 4-4 identifica-se de imediato a existência de um ponto máximo de tensão precedido por uma zona linear. Uma observação mais detalhada desta região revela que a evolução desta curva não é completamente linear antes de ser atingido o ponto máximo. O início desta região não linear coincide com o final da região em que o comportamento é apenas elástico. Os ensaios

cíclicos realizados neste trabalho tiveram como objectivo caracterizar e melhorar a compreensão desta parte não linear da curva tensão-extensão. Nos ensaios de tracção cíclicos, onde a extensão de carga em cada ciclo foi crescente, permitiram quantificar, no final de cada ciclo (do qual era conhecido o valor máximo de extensão total imposto), duas componentes da deformação: uma componente elástica, correspondente à extensão que é recuperada na fase de descarga, e outra, aqui denominada de inelástica que corresponde à diferença entre a extensão total imposta no final da carga e a componente elástica. A figura 4-8 mostra um exemplo das curvas obtidas neste tipo de ensaio.

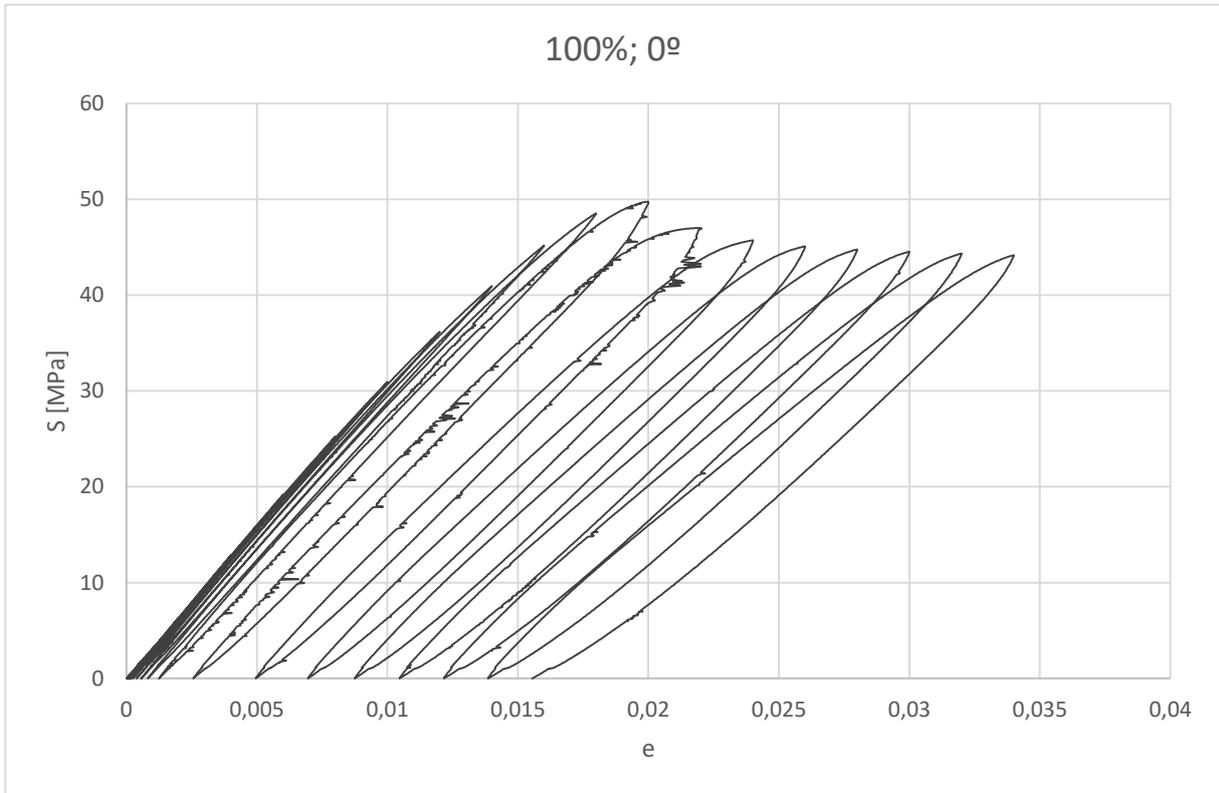
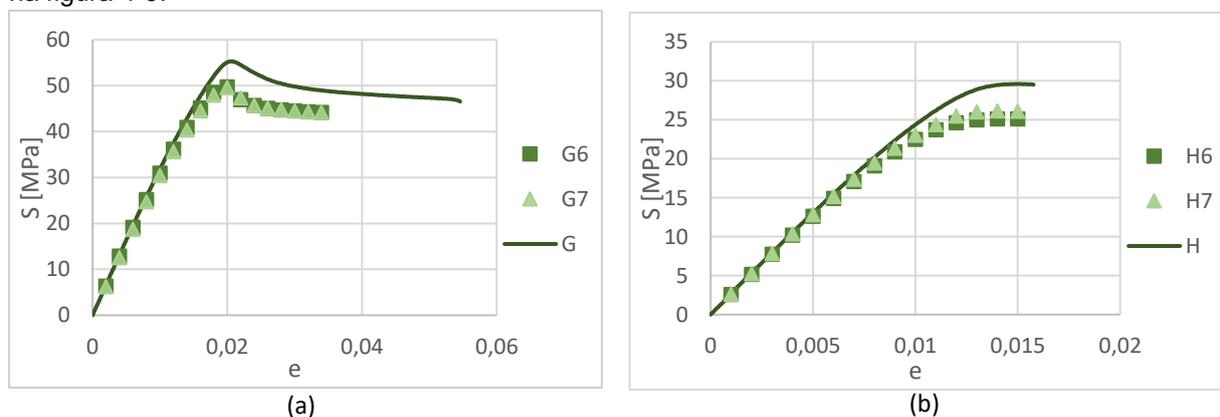


Figura 4-8 Curva obtida do ensaio cíclico de um provete de tracção com 100% de enchimento e orientação de impressão de 0°

Representando graficamente, para cada uma das orientações dos provetes com 100% de enchimento, os pontos de tensão máxima de cada ciclo, conclui-se que estes reproduzem aproximadamente o comportamento das curvas obtidas nos ensaios quase-estáticos, tal como ilustrado na figura 4-9.



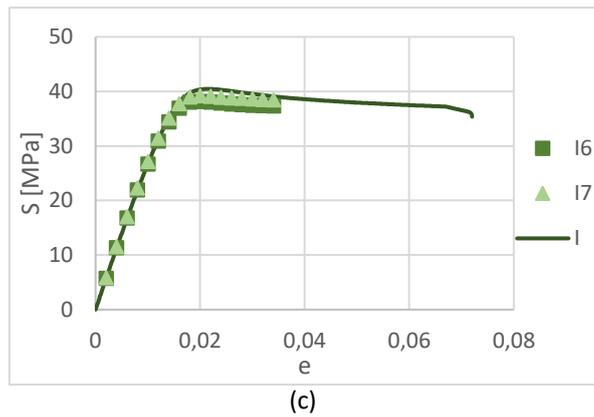


Figura 4-9 Comparação dos pontos máximos dos ensaios de tracção cíclicos e das curvas obtidas dos ensaios quase-estáticos dos provetes com 100% de enchimento e orientação de: (a) 0° ; (b) 90° ; (c) $\pm 45^\circ$

Uma observação detalhada das curvas tensão-extensão obtidas nestes ensaios (ilustrada na figura 4-8, relativa a um provete de tracção de 100% de enchimento e 0° de orientação de impressão) permite concluir que os declives das curvas de carga e descarga de cada ciclo não se mantêm durante o ensaio, isto é, alteram-se de ciclo para ciclo. Na tentativa de contabilizar esta variação, tomou-se como referência o declive do primeiro ciclo de cada um dos ensaios, assumindo que este representa uma descarga puramente elástica.

Tendo determinado este declive, foi traçada uma recta a partir do fim de cada um dos ciclos, de forma a ilustrar qual seria o andamento da curva se a descarga fosse puramente elástica, tal como ilustrado na figura 4-10.

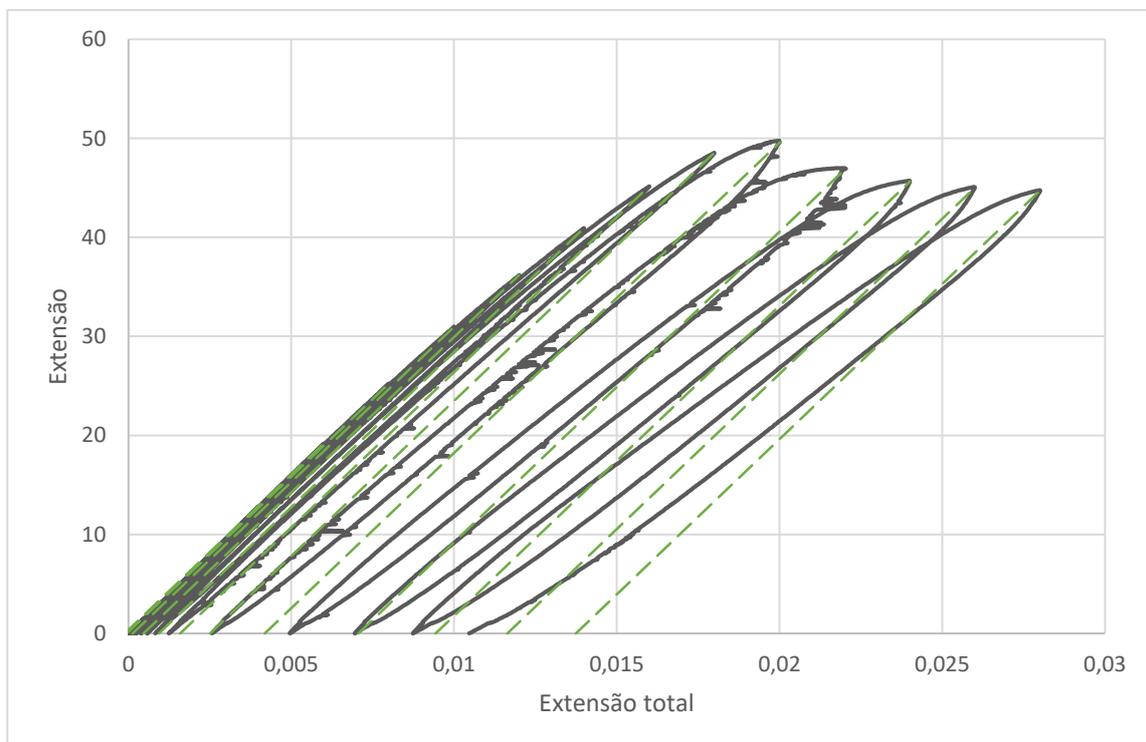


Figura 4-10 Representação da descarga puramente elástica de cada ciclo

Uma vez que a curva registada não coincide com esta recta, conclui-se que, a partir de determinado ponto, a descarga não é puramente elástica e que, assim sendo, a componente

anteriormente identificada como elástica tem, na verdade, uma componente viscoelástica. Assim, a extensão total verificada no final de cada ciclo de carga pode ser decomposta de acordo com:

$$e_T = e_I + e_E \quad (4.5)$$

$$e_e = e_{viscoelástica} + e_{PE} \quad (4.6)$$

onde e_T representa a extensão total no final de cada ciclo de carga, e_I representa a componente inelástica, e_E representa a componente elástica, $e_{viscoelástica}$ representa a componente viscoelástica e e_{PE} representa a componente perfeitamente elástica.

Esta decomposição é ilustrada na figura 4-11 onde se encontra representado apenas um ciclo de carga e descarga do ensaio de tracção cíclico de um provete denso impresso a 0°.

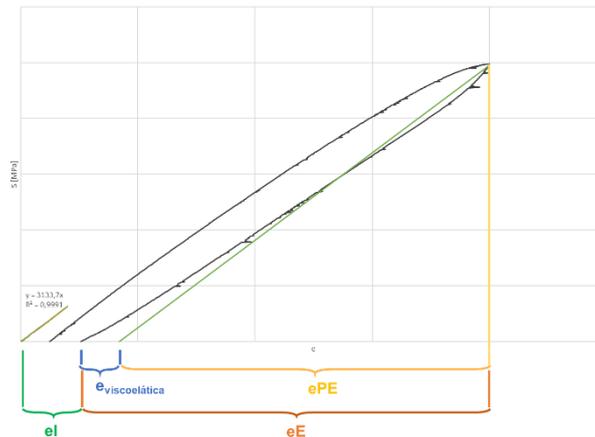


Figura 4-11 Decomposição das componentes da extensão total de cada ciclo

O ponto em que esta componente viscoelástica começa a apresentar valores significativos deve coincidir, aproximadamente, com o início da região não-linear da curva tensão-extensão, existente antes de se atingir a tensão máxima, conforme referido anteriormente.

A figura 4-12 ilustra a evolução das componentes de extensão inelástica, “ e_I ”, extensão elástica, “ e_E ”, e ainda a componente elástica sem a parcela viscoelástica (extensão perfeitamente elástica), “ e_{PE} ”, em função da extensão nominal máxima em cada ciclo durante os ensaios de tracção dos provetes densos impressos a 0°. A análise destes resultados, correspondentes aos provetes com orientação 0°, permite concluir que a componente viscoelástica começa a apresentar valores relevantes aproximadamente a partir de uma extensão total $e = 0,014$, o que significa que será aproximadamente neste ponto que a curva tensão-extensão nominal destas estruturas deverá deixar de ter uma evolução

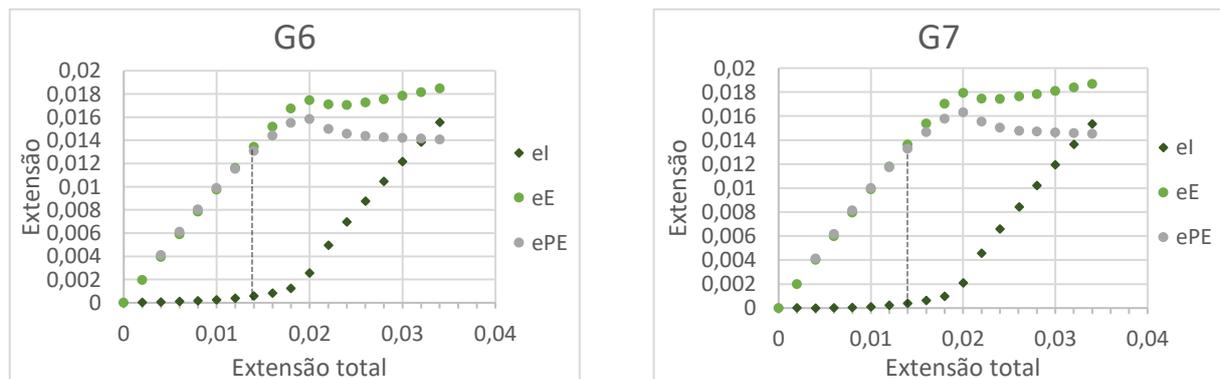


Figura 4-12 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de 0°: provete nº6 (esquerda) e provete nº7 (direita)

linear e passa a apresentar uma relação entre a tensão e a extensão não linear. Neste caso, este ponto corresponde a tensões de $\sigma = 40,934 \text{ MPa}$ e $\sigma = 40,356 \text{ MPa}$.

A observação destas evoluções permite ainda concluir que, a partir de determinado instante, a componente elástica passa a ser aproximadamente constante, verificando-se também que o momento em que tal acontece coincide aproximadamente com o ponto definido como ponto de cedência nos polímeros. Este patamar da componente elástica da deformação foi também identificado por Hong K. e Strobl G [35] em ensaios de tracção de polímeros semi-cristalinos. As evoluções respeitantes aos restantes provetes de tracção com 100% de enchimento e outras direcções de impressão são apresentadas adiante.

Tendo em consideração a natureza das estruturas impressas é de supor que o comportamento mecânico das mesmas possa dever-se à contribuição de diversos factores: por um lado, o comportamento intrínseco do material (PLA), influenciado, por exemplo, pela sua microestrutura; por outro, a influência da sua geometria, do processo de fabrico e das condições do ensaio. No que diz respeito à geometria, as alterações das dimensões dos provetes durante a realização do ensaio podem contribuir para a deformação ou, pelo contrário, dificultá-la. Por exemplo, no caso dos ensaios de tracção, o alongamento do provete promove uma redução da área de secção do mesmo e, deste modo, a sua influência é no sentido de facilitar a deformação. As figuras 4-13 – 4-15 apresentadas de seguida tentam isolar este efeito e contabilizar a sua contribuição para o comportamento efectivamente registado. Para a construção destes gráficos foi necessário novamente ter em consideração que o volume se manteve constante durante o ensaio, já aplicada anteriormente para o cálculo das curvas verdadeiras de tensão-extensão. Esta condição de incompressibilidade permitiu, a partir do deslocamento registado a cada instante do ensaio, determinar a correspondente área de secção resistente e, assim, determinar a força que seria necessário aplicar em cada provete para o continuar a deformar depois do primeiro ponto de carga máxima registado, caso esta força fosse governada apenas pelo factor geométrico da área. Esta análise foi realizada para três provetes de tracção, um de cada uma das orientações consideradas neste estudo.

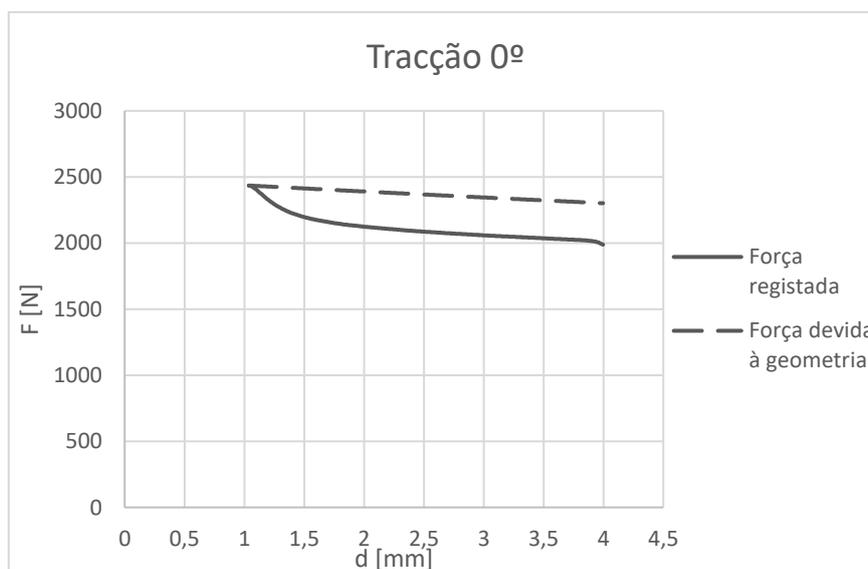


Figura 4-13 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de 0º

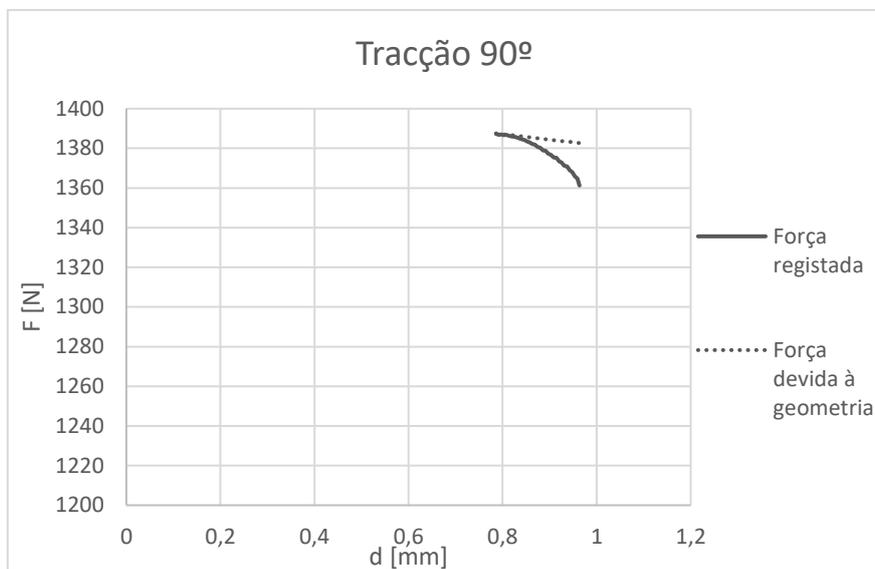


Figura 4-14 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de 90º

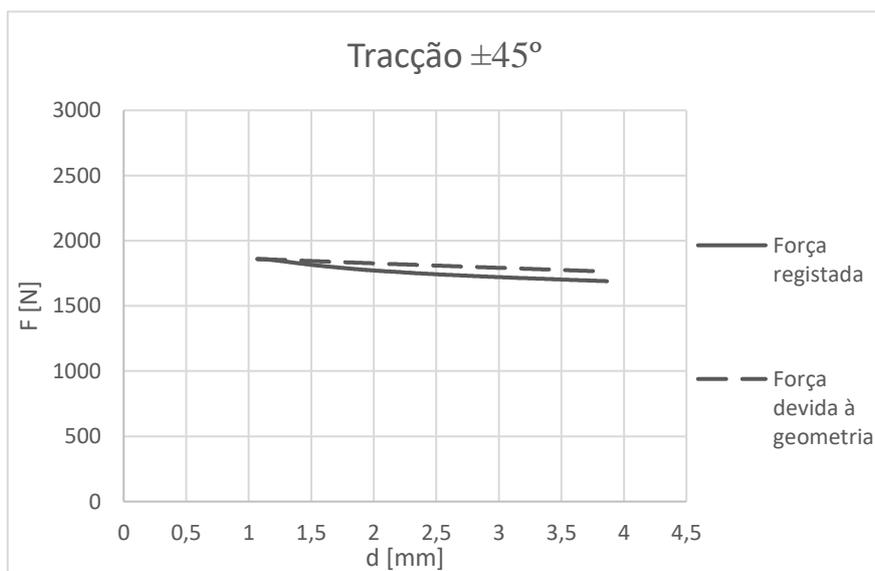


Figura 4-15 Determinação da influência da variação da área na força num provete de tracção de 100% de enchimento e orientação de impressão de ±45º

Tal como previsto, contabilizando apenas a influência da variação da área de secção a força necessária para a deformação é decrescente. Ainda assim, em alguns pontos o decréscimo registado é superior ao decréscimo da força, o que mostra que existem outros fenómenos responsáveis por facilitar a deformação, entre os quais pode estar um amaciamento intrínseco do material, característico destes materiais poliméricos.

Nos materiais poliméricos o primeiro ponto máximo das curvas tensão-extensão é geralmente identificado como o ponto de cedência. Observando a curva correspondente ao provete com 100% de enchimento e 0º de orientação (representada na figura 4-6) constata-se que depois deste instante se

verifica uma redução abrupta da tensão. Esta queda, descrita como “*strain softening*”, apesar de não estar totalmente explicada na literatura da especialidade, pode ser associada a diferentes fenómenos no interior dos polímeros, como por exemplo, a localização de pequenas regiões do material com deformação mais intensa ou aparecimento de “*shear bands*”. Este facto justifica a diferença entre a força calculada e a força registada observada na figura 4-13. É ainda observável na mesma figura que, a partir de determinado instante do ensaio ($\approx d = 1,75 \text{ mm}$), a força registada e a força calculada (devida à variação da área) têm o mesmo declive. Com base nestas análises, assume-se que o ponto máximo corresponde ao aparecimento de zonas com deformações localizadas, que posteriormente se vão alastrando até que passe a ser aproximadamente uniforme, dando origem a um decréscimo da tensão equivalente ao decréscimo causado pela redução de área, sugerindo que esta passa a ser a única causa da variação da força.

No caso das curvas tensão-extensão correspondentes aos provetes de 90°, é também possível visualizar a existência de uma zona não linear da curva antes de ser atingido o ponto máximo. Esta observação é corroborada pelos resultados dos ensaios cíclicos apresentados na figura 4-16, onde a deformação inelástica passa a ser relevante a partir de um valor de deslocamento de $e \approx 0,007$, correspondente, neste caso, a tensões de aproximadamente $\sigma = 17,085 \text{ MPa}$ e $\sigma = 17,379 \text{ MPa}$.

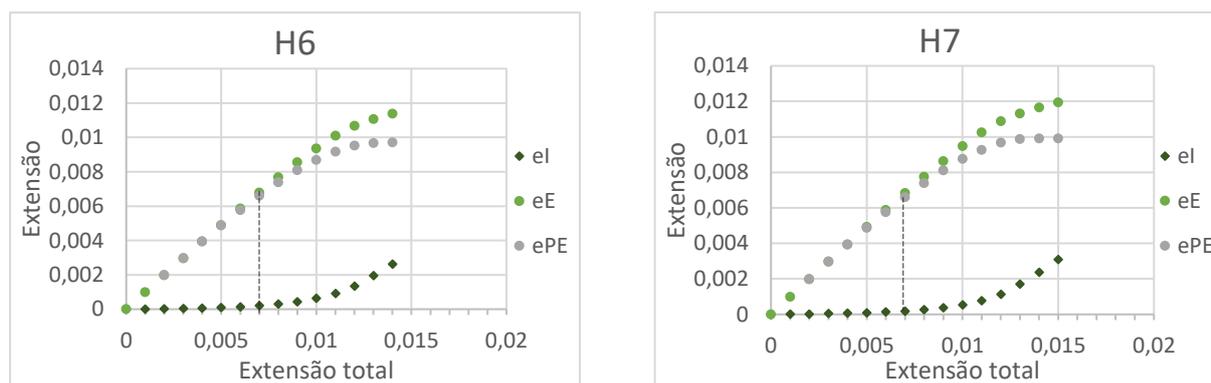


Figura 4-16 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de 90°: provete nº6 (esquerda) e provete nº7 (direita)

No entanto, neste caso não existe um amaciamento significativo após o ponto máximo, verificando-se sim a quebra do provete (figura 4-14). Enquanto a orientação de 0° origina uma fractura dúctil, os provetes com orientação 90° apresentam fractura frágil (sendo as superfícies de fractura dos provetes de tracção apresentadas no Anexo C1 para o caso de provetes com 100% de preenchimento e nos Anexos C2 e C3 para os provetes com 75% e 50%, respectivamente). É também interessante notar que enquanto a fractura do primeiro resulta da fractura dos filamentos, no segundo caso a fractura dá-se devido à quebra da ligação entre filamentos, sugerindo que a resistência da ligação entre filamentos é inferior à resistência do próprio filamento, uma vez que o provete fracturou quando foi atingida uma força suficiente para promover a separação dois filamentos, mas ainda insuficiente para os deformar significativamente.

Analisando a curva tensão-extensão dos provetes impressos com orientação de $\pm 45^\circ$, o seu comportamento pode ser compreendido como intermédio dos dois comportamentos analisados anteriormente, uma vez que as respectivas curvas se situam entre as curvas dos provetes impressos a 0° e 90°. Importa ainda referir que o início destas curvas é semelhante ao que se observou

anteriormente, exibindo uma parte linear inicial, seguida de uma evolução não linear um pouco antes do ponto máximo. Neste caso, de acordo com as figuras 4-17, a partir dos ensaios cíclicos, conclui-se que esta transição ocorre aproximadamente com $e \approx 0,01$, correspondente, neste caso, a tensões de $\sigma = 26,714 \text{ MPa}$ e $\sigma = 27,139 \text{ MPa}$.

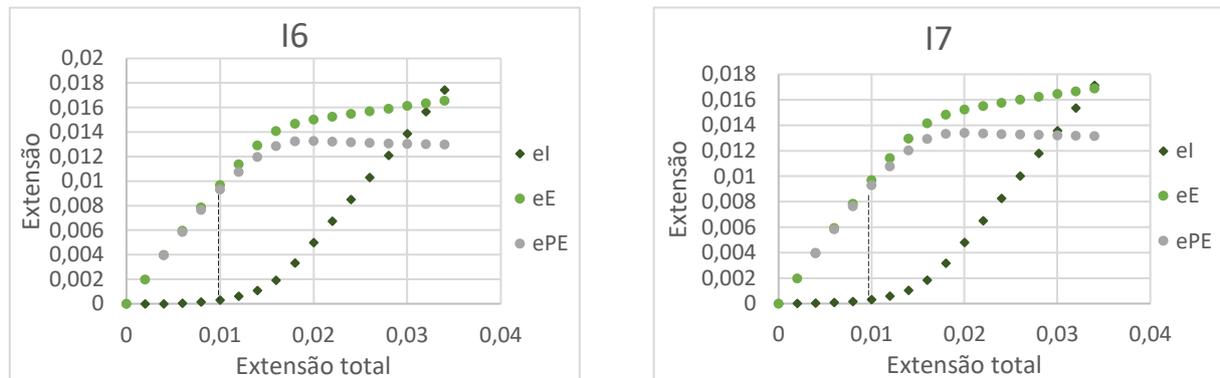


Figura 4-17 Evolução das componentes de extensão dos provetes de tracção com enchimento 100% e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$: provete n°6 (esquerda) e provete n°7 (direita)

A evolução da curva tensão-extensão a partir do instante de tensão máxima diferencia-se do comportamento das curvas descritas para os provetes com as outras direcções de impressão. Em particular, neste caso o provete consegue atingir os mesmos níveis de deformação dos provetes com 0° , no entanto, não se verifica a mesma queda abrupta de tensão após o ponto máximo. Na figura 4-15 observa-se que, ainda que a força desça ligeiramente, esta variação é pouco significativa e a curva registada acompanha a curva da força resultante da redução da área aproximadamente desde a ocorrência do ponto máximo. Este tipo de comportamento aparenta ser consequência da estrutura do provete. Os filamentos encontram-se a 45° relativamente à direcção de aplicação da força, o que significa que a força em cada um deles pode ser decomposta numa componente ao longo do seu comprimento e numa perpendicular a esta, cuja resultante é a força vertical aplicada. Este facto pode significar que a tensão em cada um dos filamentos (e no conjunto de todos eles, como consequência) seja ligeiramente inferior à tensão verificada no caso dos provetes com orientação de 0° , sendo este valor de tensão suficiente para deformar uniformemente o provete, mas insuficiente para dar origem a zonas de deformação localizada.

4.2.2. Ensaios de compressão uniaxial

A análise dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial será efectuada de modo análogo à realizada anteriormente para os resultados dos ensaios de tracção. Na figura 4-18 estão representadas as curvas nominais de tensão-extensão dos ensaios de compressão realizados, para cada uma das três direcções de impressão com 100% de percentagem de enchimento. Nos Anexos B1 e B2 são apresentados os valores de tensão máxima e o correspondente valor de extensão e o módulo de elasticidade, E , de cada um dos ensaios, os valores médios para cada conjunto de estruturas e o respectivo desvio padrão. Os valores de tensão de fractura não são apresentados uma vez que não ocorreram fracturas nos níveis de deformação atingidos nestes ensaios. Na figura 4-19 encontram-se

representados graficamente, para cada uma das orientações de impressão, os valores médios e os respectivos desvios-padrão das propriedades enumeradas anteriormente.

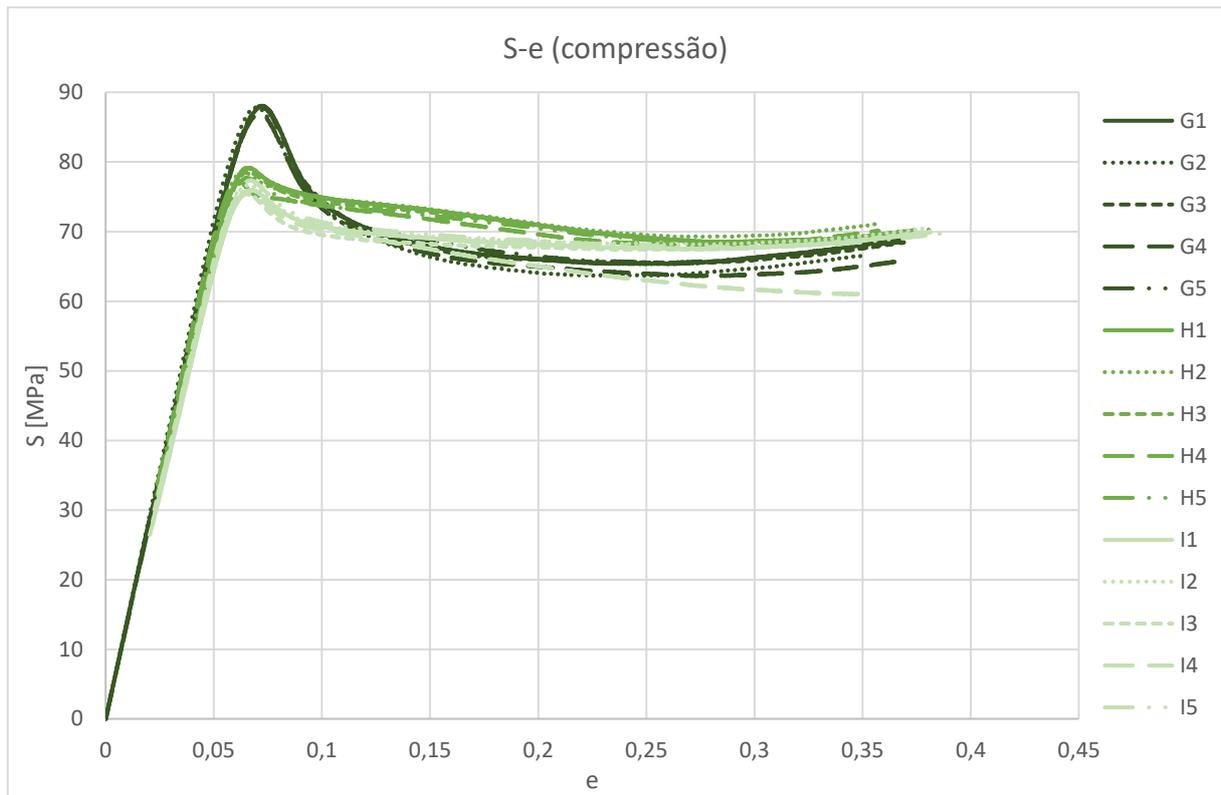


Figura 4-18 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento

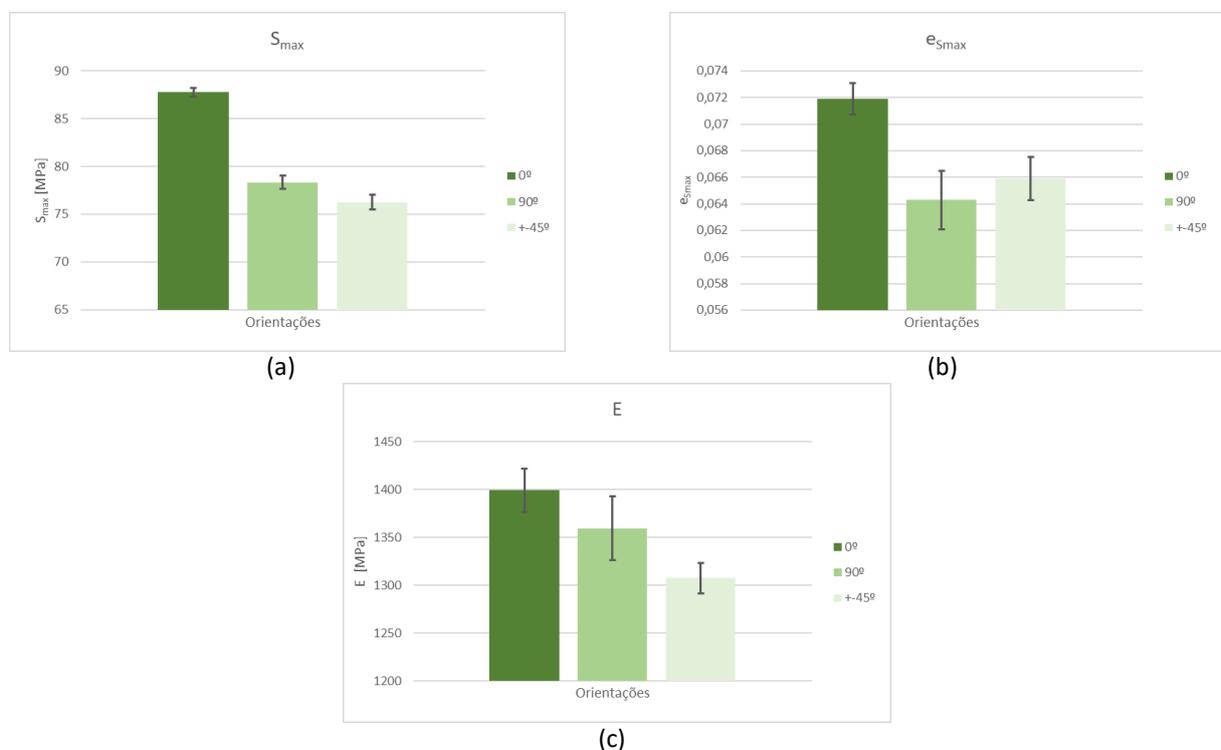


Figura 4-19 Representação gráfica da variação das propriedades nominais de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade

Na figura 4-20 estão representadas as curvas verdadeiras de tensão-extensão dos ensaios de compressão uniaxial, para cada uma das três direções com 100% de percentagem de enchimento. Na figura 4-21 encontram-se representados graficamente os valores verdadeiros das mesmas propriedades anteriormente expostas para os valores nominais, bem como os valores médios e os respectivos desvios-padrão.

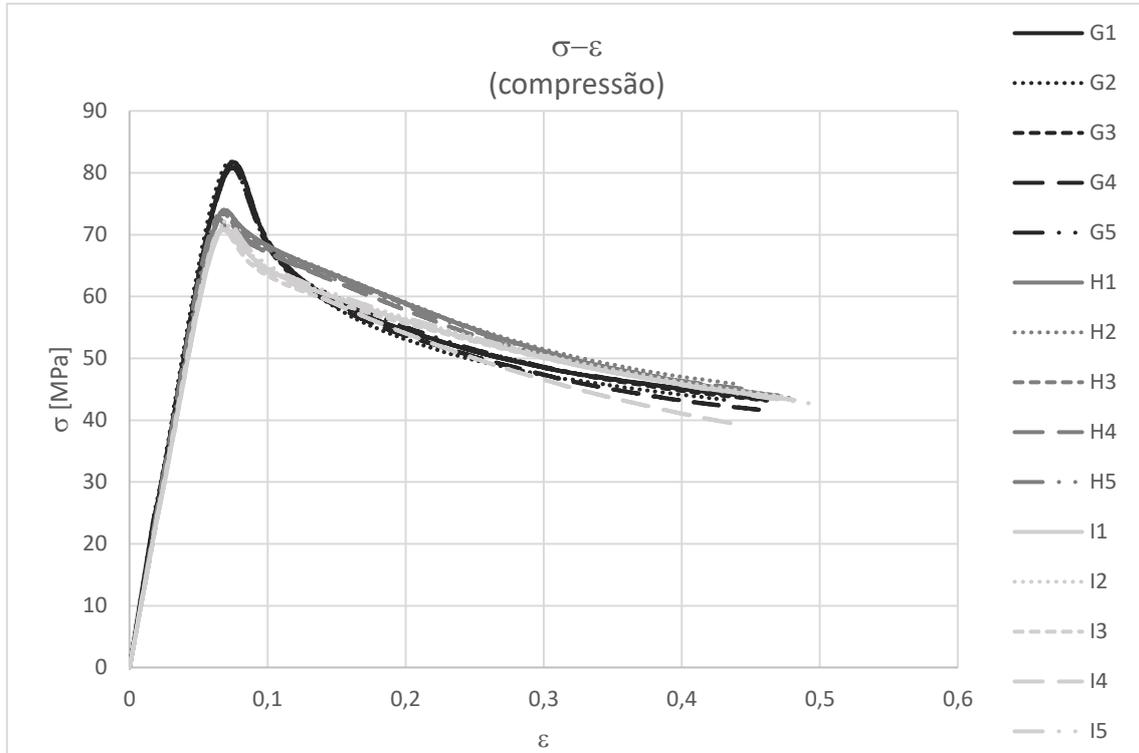


Figura 4-20 Curvas verdadeiras tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento

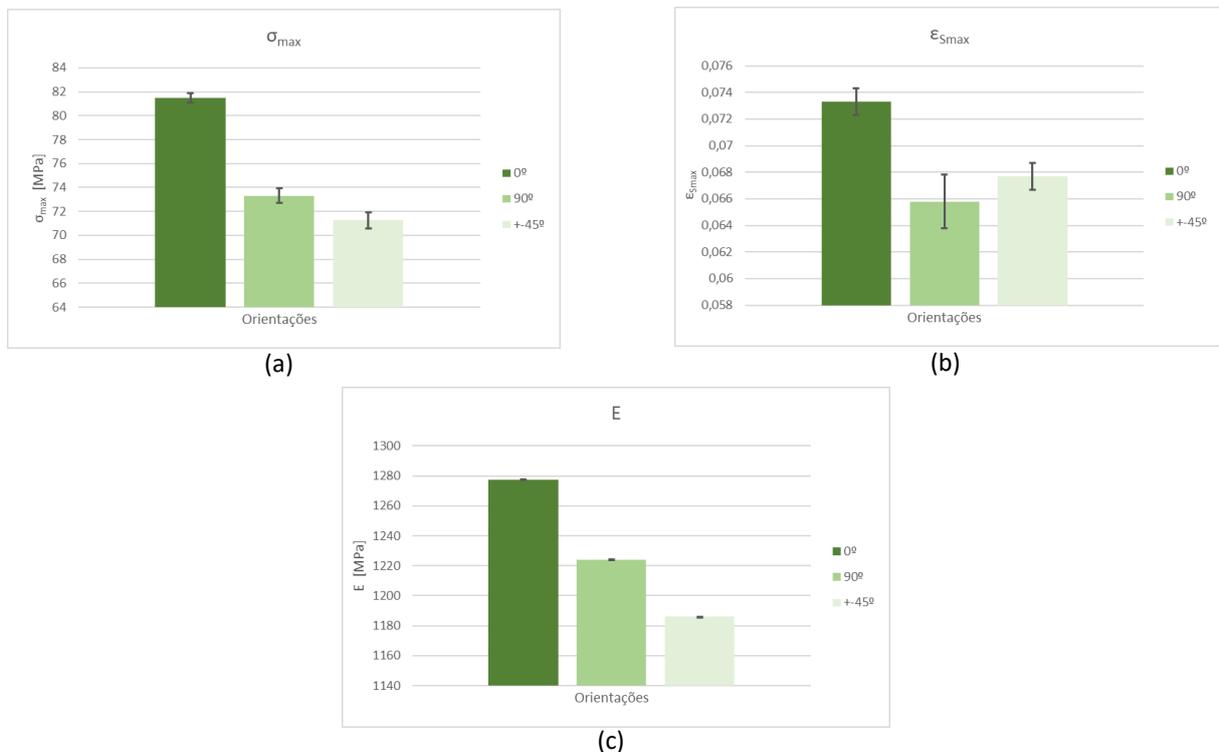


Figura 4-21 Representação gráfica da variação das propriedades verdadeiras de provetes com 100% de enchimento: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade

Ao contrário do que se verifica nas curvas de tracção, as curvas tensão-extensão verdadeiras de compressão são significativamente diferentes das curvas nominais. Esta diferença é visível não só nos valores analisados, mas principalmente no andamento das curvas: a curva verdadeira apresenta uma tendência continuamente decrescente após o ponto máximo, enquanto a curva nominal apresenta, a partir de determinado instante, um aumento da tensão nominal, devido ao aumento da força de compressão. No entanto, tendo em conta os níveis de extensão a que foram levados os provetes e as condições que foram observadas durante o ensaio, conclui-se que este comportamento não é exclusivamente representativo do material, podendo resultar da instabilização da deformação, que deixa de ser uniforme bastante antes do fim do ensaio, conforme se verificou experimentalmente. Neste contexto a análise da curva verdadeira de tensão-extensão deverá ser analisada com algum cuidado para níveis de extensão significativamente superiores às verificadas no instante de tensão máxima. Apesar desta diferença, a evolução das curvas nominais e verdadeiras apresentam semelhanças até ser atingidas a tensão máxima.

Uma vez que dos ensaios cíclicos de compressão resultam curvas com uma região inicial não linear (devida à adaptação inicial da geometria dos topos do provete e que obriga à correcção de todas as curvas, conforme anteriormente), não é possível garantir que o declive das curvas tensão-extensão retirado de uma fase inicial dos ensaios cíclicos não seja já influenciado pela adaptação e deformação plástica localizada da arestas boleadas do provete (ilustrada na Figura 4-2). Assim, não será aqui realizada a mesma análise que se efectuou anteriormente nos ensaios de tracção para determinar o instante em que a região linear termina.

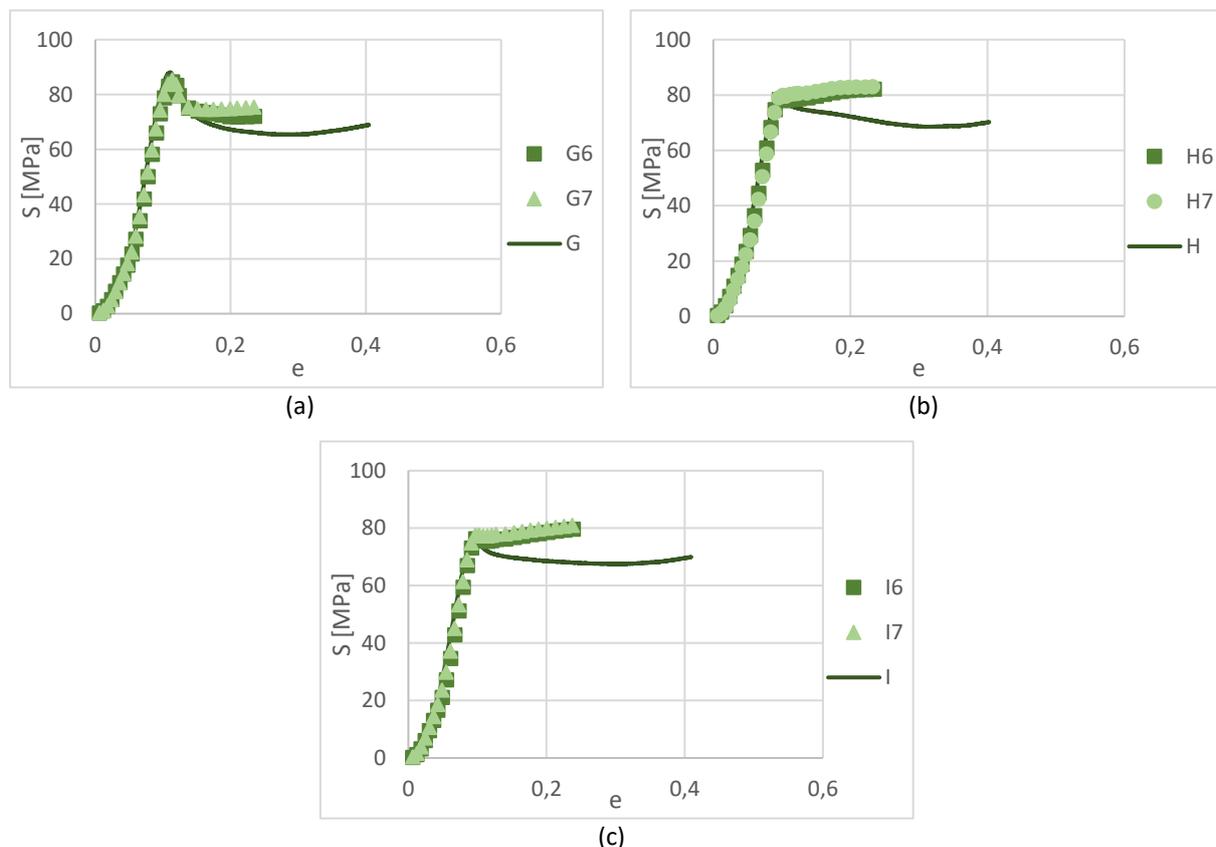


Figura 4-22 Comparação dos pontos máximos dos ensaios de compressão cíclicos e das curvas obtidas dos ensaios quase-estáticos dos provetes com 100% de enchimento e orientação de: (a) 0° ; (b) 90° ; (c) $\pm 45^\circ$

No entanto, é ainda possível verificar que os pontos de tensão máxima de cada ciclo reproduzem aproximadamente as curvas tensão-extensão obtidas a partir dos ensaios quase-estáticos, tal como se mostra na figura 4-22 para os provetes com 100% de enchimento.

À semelhança do que foi feito para o caso das curvas de tracção, procedeu-se a uma tentativa de contabilização do efeito da variação da geometria no ensaio de compressão. Para tal, tomou-se novamente como constante o valor da tensão verificado no ponto máximo da curva e, assumindo que a deformação ocorre a volume constante, foi calculada a força necessária para deformar o provete caso a variação de área fosse o único fenómeno a governar o processo. As figuras 4-23 – 4-25 ilustram este tratamento.

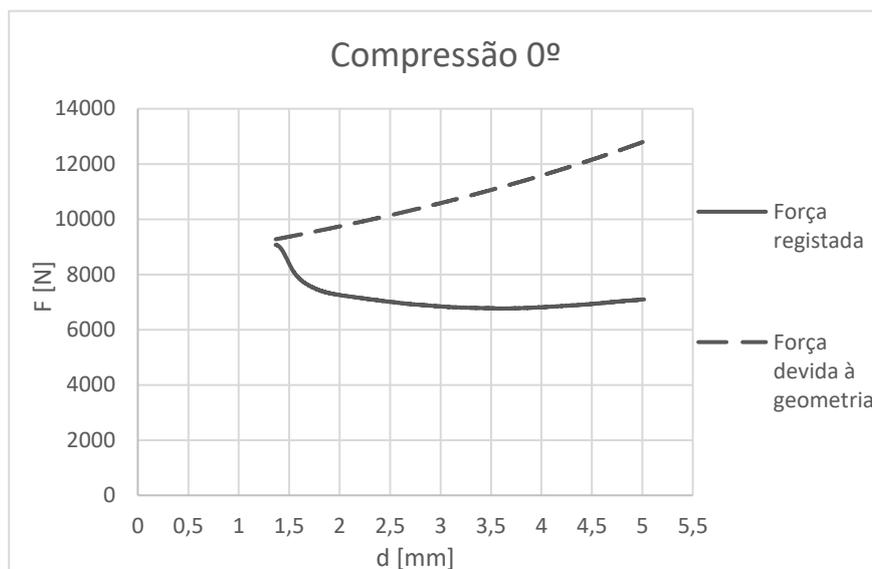


Figura 4-23 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de 0º

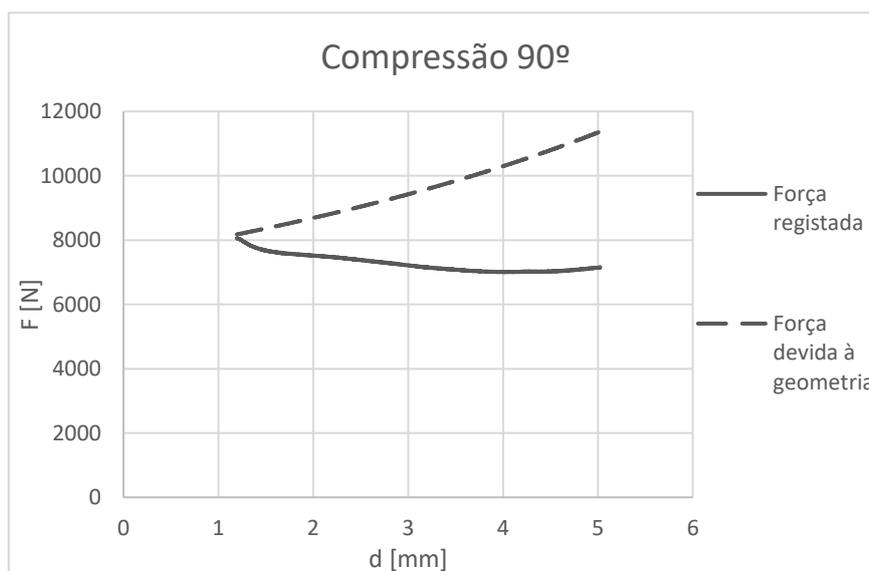


Figura 4-24 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de 90º

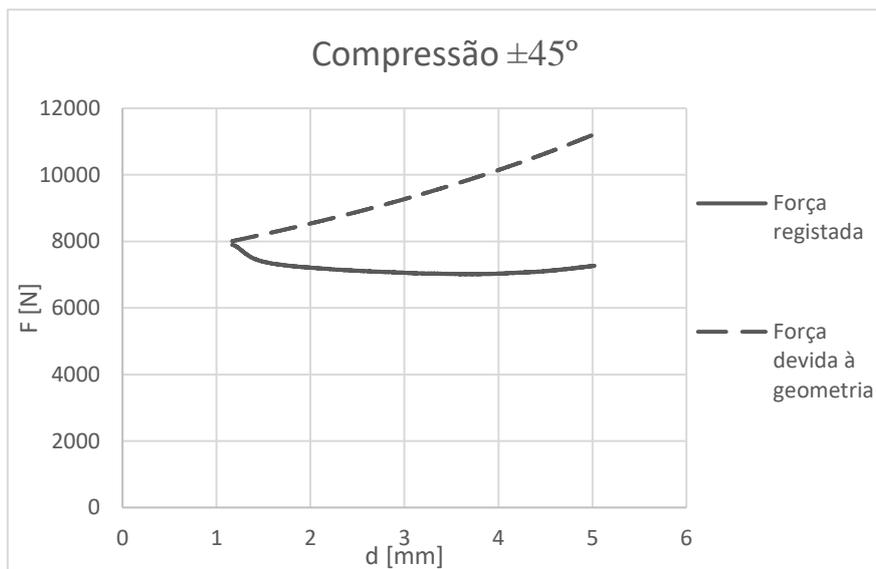


Figura 4-25 Determinação da influência da variação da área na força num provete de compressão de 100% de enchimento e orientação de impressão de $\pm 45^\circ$

Mais uma vez confirma-se o esperado em relação à influência da área: para uma tensão constante, o aumento da área obriga a um aumento da força necessária, dificultando a deformação. No entanto, tal como sucedeu anteriormente, a registo da força não coincide com a força calculada, sendo neste caso a diferença mais significativa do que no caso dos ensaios de tracção uniaxial, qualquer que seja a direcção de impressão considerada. Neste caso, a força registada tem mesmo um andamento distinto, sendo em alguns momentos decrescente, contrariando a tendência de aumento de força causado pelo aumento da área de secção. Apesar das diferenças referidas, volta a verificar-se que o amaciamento posterior ao ponto de tensão máxima é superior nos provetes cuja orientação de impressão é 0° .

Supõe-se então que o decréscimo geral da força observado em todos os provetes seja devido à instabilização da deformação, já referida anteriormente. A deformação concentra-se em algumas zonas dos provetes, facilitando a deformação global destas estruturas nos instantes mais avançados do ensaio. Nos provetes com 90° e $\pm 45^\circ$ esta deformação é visível numa zona aproximadamente a meio da sua altura. Quando a deformação nesta zona se aproxima do limite e se começa a tentar alastrar à zona do topo e da base, a força sofre uma inflecção e volta a aumentar. A justificação proposta para a maior queda nos provetes com orientação 0° é semelhante à apresentada anteriormente. Neste caso, ao decréscimo verificado em todos os provetes derivado da instabilidade, deve somar-se o efeito de um fenómeno de localização da deformação, intrínseco do material.

4.2.3. Comparação entre os resultados dos ensaios tracção e compressão uniaxiais

Comparando os resultados das curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios de tracção e compressão uniaxial, algumas ideias podem ser retidas. Conclui-se que, qualquer que seja o tipo de solitação considerado, as curvas apresentam um início linear, transitando para uma região ligeiramente não-linear antes de ser atingido o ponto máximo. Verifica-se ainda que, em ambos os

casos, o ângulo de deposição de 0° apresenta maior resistência mecânica relativamente às restantes direcções, bem como um amaciamento superior após o ponto máximo de tensão. Este facto pode estar associado ao alinhamento da direcção dos filamentos impressos e a direcção de aplicação da carga. À tracção, observa-se uma clara diferença entre a resistência mecânica dos provetes impressos a 90° e os provetes de $\pm 45^\circ$, expressa na evolução das respectivas curvas de tensão-extensão. Os provetes com $\pm 45^\circ$ apresentam uma resistência intermédia relativamente aos provetes de 0° e de 90° , e, tal como os provetes de 0° , conseguem atingir níveis de deformação significativamente superiores aos atingidos na tracção dos provetes impressos a 90° . Observou-se que os provetes de 90° apresentaram fractura frágil, que ocorreu imediatamente após ser atingida a tensão máxima e que pode ser justificada pelas suas condições de construção: neste caso, a solicitação tende a promover a separação dos filamentos que foram depositados consecutivamente. Já o coeficiente de Poisson (determinado apenas no caso dos ensaios de tracção) foi semelhante em qualquer das direcções de impressão estudadas.

As estruturas impressas testadas sob estados de compressão uniaxial não apresentaram fracturas, tendo a redução em altura sido levada a níveis para os quais a deformação já não era uniforme. Assim, a comparação dos níveis máximos de extensão entre a solicitação de tracção e de compressão tem pouco interesse.

Podem ainda concluir-se que a tensão máxima suportada pelo material à tracção é significativamente inferior à suportada pelo material à compressão, enquanto que o módulo de elasticidade à tracção é superior ao módulo de elasticidade à compressão. A variação destas duas propriedades e da extensão no ponto de tensão máxima em função da direcção de impressão encontra-se representada nas figuras 4-26.

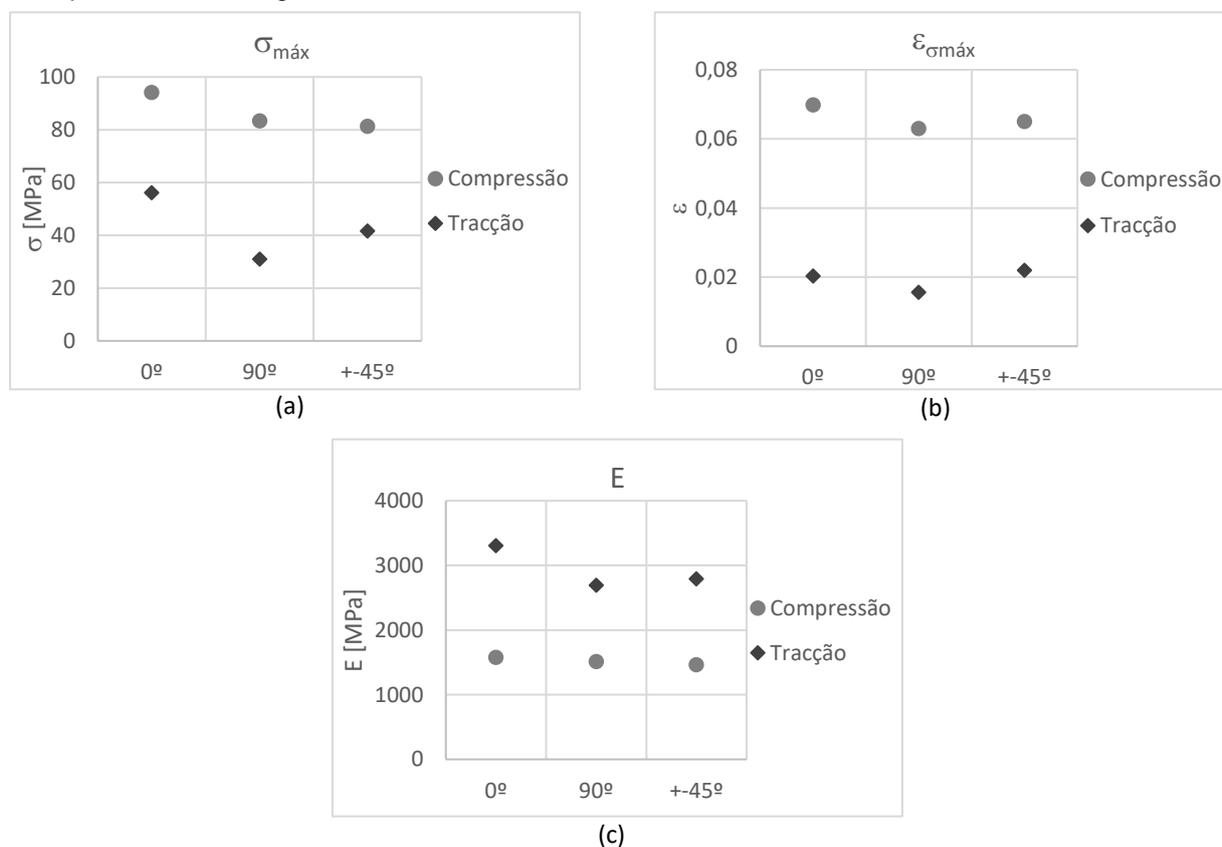


Figura 4-26 Representação gráfica da comparação entre os valores verdadeiros das propriedades à tracção e à compressão: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Módulo de elasticidade

4.3. Outras percentagens de enchimento

Uma das vantagens do fabrico aditivo é a possibilidade de fabricar objectos não densos, podendo controlar a sua estrutura interna e poupando tempo de fabrico, peso e material. Torna-se assim relevante perceber que diferenças o comportamento mecânico deste tipo de estruturas apresenta relativamente às estruturas densas. Assim, para além de diferentes orientações, os provetes foram também impressos com diferentes percentagens de enchimento. Os resultados referentes aos provetes cuja percentagem de enchimento foi definida como 100% foram apresentados na secção anterior. Serão agora apresentados os resultados experimentais dos ensaios de tracção e compressão uniaxial dos provetes impressos com 75% e 50% de enchimento. Estes valores serão também comparados com os valores obtidos anteriormente para os provetes impressos com 100% de enchimento. Tal como já foi mencionado, e conforme era esperado, no caso em que as percentagens de enchimento são inferiores a 100%, as variações de volume após os ensaios de compressão foram significativas. A ausência de incompressibilidade durante a deformação destas estruturas não permitiu obter valores verdadeiros de tensão e extensão, pelo que os resultados experimentais aqui apresentados correspondem a valores nominais.

4.3.1. Ensaio de tracção uniaxial

As figuras 4-27 e 4-28 mostram, para cada percentagem de enchimento, as curvas nominais tensão-extensão obtidas com cada uma das orientações de impressão em estudo.

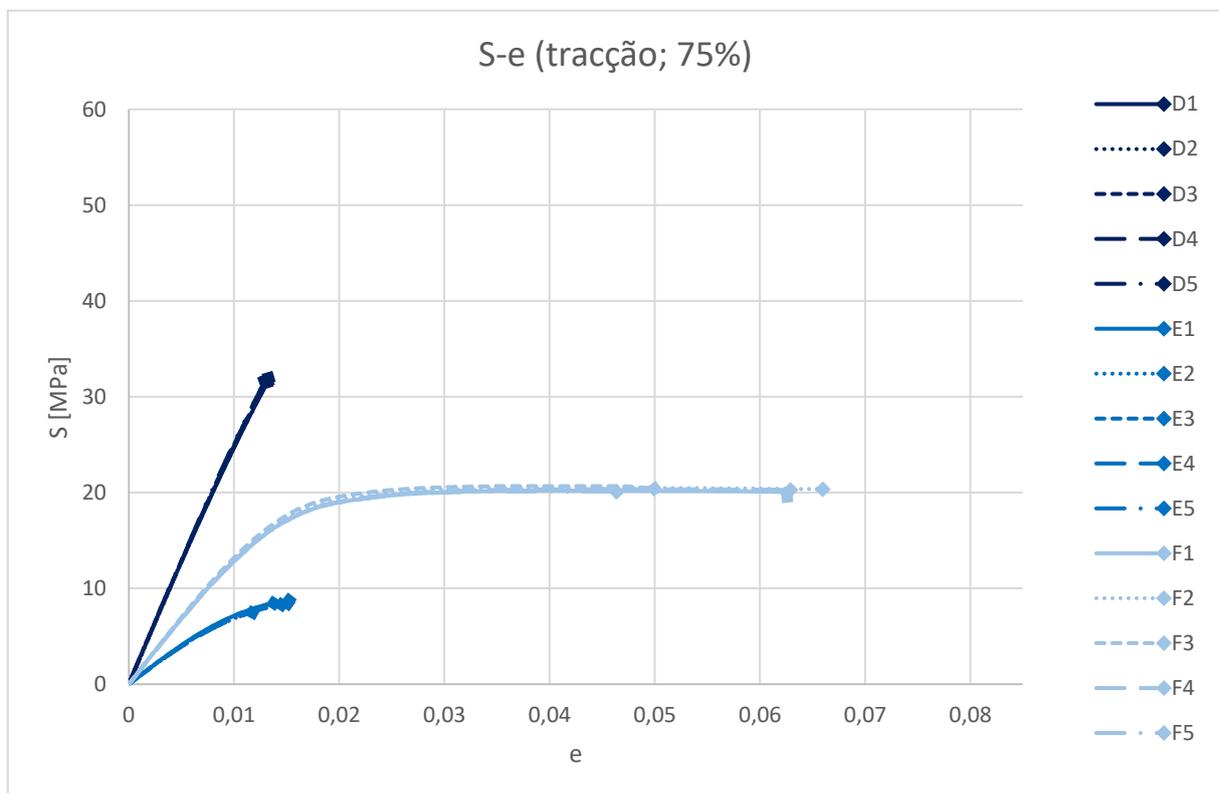


Figura 4-27 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tracção de todas as orientações de impressão com 75% de enchimento

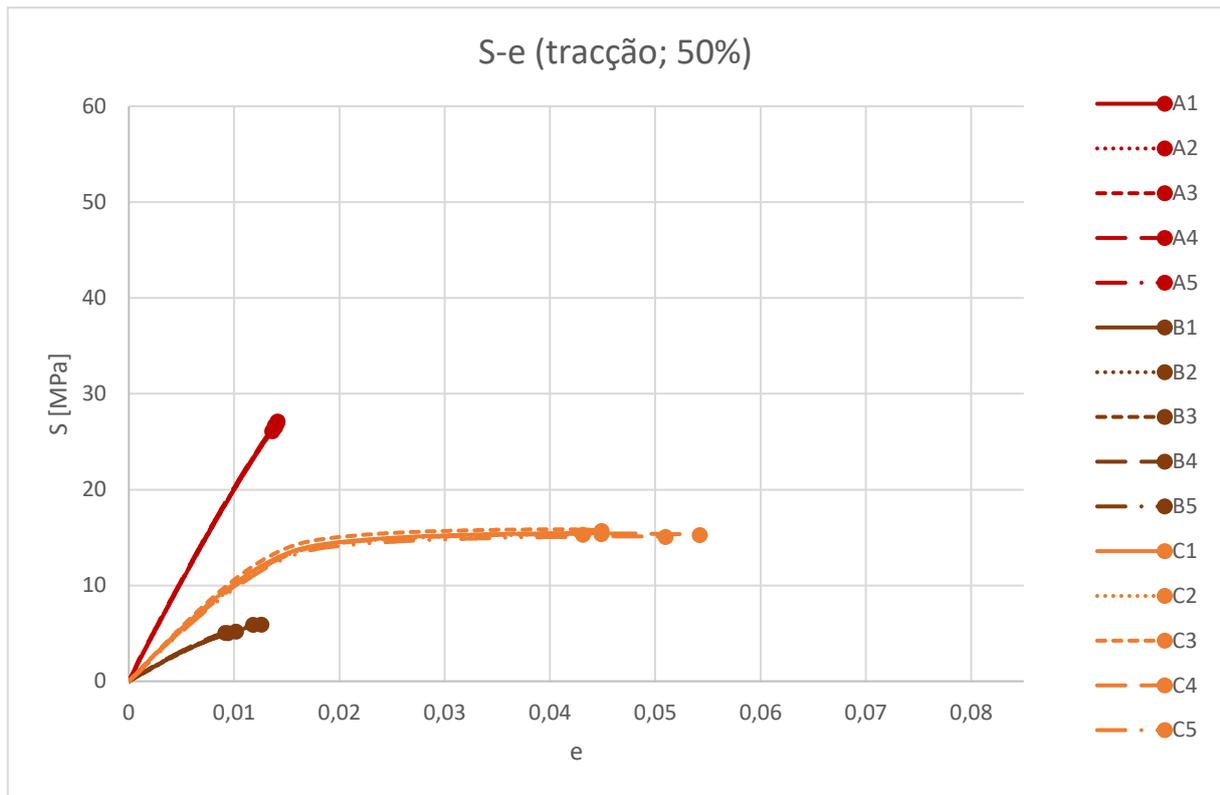


Figura 4-28 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de tração de todas as orientações de impressão com 50% de enchimento

Uma análise preliminar destas curvas permite visualizar que, para cada orientação, a repetibilidade das curvas é novamente elevada. Destaca-se também que a evolução das curvas, entre percentagens, é semelhante para cada orientação de impressão, excepto na orientação 0° , caso em que a curva se altera significativamente quando os provetes deixam de ser densos, passando de um comportamento dúctil, em que se verificava amaciamento com a deformação (*strain softening*), para um comportamento mais semelhante ao tipo frágil.

Uma das diferenças mais significativas dos provetes não densos prende-se com as menores resistências mecânicas destes quando comparados com os provetes densos. Este facto é facilmente justificado uma vez que menores percentagens de enchimento conduzem a menos material existente dentro do provete para suportar a carga aplicada.

Tal como já foi referido anteriormente, as curvas nominais apresentadas foram obtidas com base nos valores de força e deslocamento e nas dimensões exteriores iniciais de cada provete. Mas, uma vez que a densidade destes provetes é inferior a 100%, o seu interior contém espaços vazios, o que significa que a área exterior não corresponde à área real das secções resistentes de cada provete. Esta área real resistente, resultante da soma da área de cada um dos filamentos disponíveis para resistir, é inferior à área utilizada nos cálculos da tensão nominal, o que significa que a tensão que está de facto aplicada no interior dos provetes é superior à calculada e, conseqüentemente, quanto menor a percentagem de enchimento, menos filamentos existem e menor a área da secção resistente. Isto significa que, ainda que as curvas indiquem que os provetes de 0° partiram com níveis de tensão bastante inferiores aos registados para o caso dos provetes densos, na realidade os níveis de tensão experienciados pelos filamentos podem ser semelhantes. Deste modo, as curvas apresentadas e as

propriedades quantificadas devem ser interpretadas como sendo inerentes às estruturas na totalidade, tendo em consideração as características do seu interior (incluindo o nível de porosidade). Importa ainda notar que estas curvas experimentais de tensão-extensão nominal continuam a apresentar uma região inicial linear, sendo, porém, a curvatura da região não linear que antecede a tensão máxima no caso dos provetes não densos mais acentuada.

Nas tabelas 4-15 – 4-20 encontram-se sintetizados o valor médio das principais propriedades mecânicas obtidas das curvas nominais de tensão-extensão dos ensaios de tracção das estruturas impressas com 50% e 75% enchimento com diferentes direcções de impressão, e ainda os respectivos valores obtidos anteriormente para os provetes densos. Para facilitar a leitura destas tabelas apresenta-se na figura 4-29 a representação gráfica dos valores das propriedades mecânicas para diferentes percentagens de enchimento em função das direcções de impressão.

Tabela 4-15 Comparação dos valores de médios de tensão máxima de cada grupo de provetes

S_{máx}			
	0°	90°	±45°
100%	54,961	30,519	40,706
75%	31,688	8,282	20,381
50%	26,727	5,407	15,443

Tabela 4-16 Comparação dos valores médios de extensão no ponto de tensão máxima de cada grupo de provetes

e_{S_{máx}}			
	0°	90°	±45°
100%	0,0206	0,0154	0,0215
75%	0,0131	0,0141	0,0427
50%	0,0139	0,0106	0,0444

Tabela 4-17 Comparação dos valores médios de tensão de fractura de cada grupo de provetes

S_b			
	0°	90°	±45°
100%	45,628	30,075	35,893
75%	31,688	8,279	20,124
50%	26,65	5,407	15,328

Tabela 4-18 Comparação dos valores médios de extensão na fractura de cada grupo de provetes

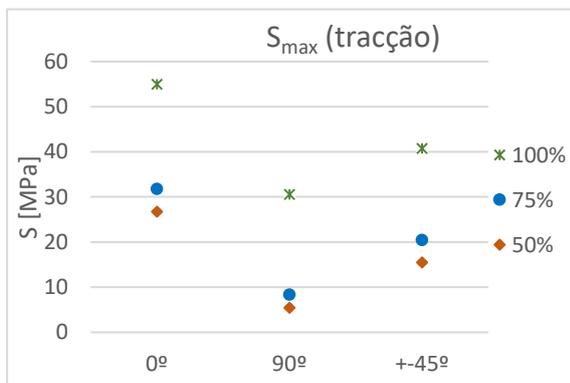
e_b	0°	90°	$\pm 45^\circ$
100%	0,0624	0,0183	0,0695
75%	0,0131	0,0141	0,0576
50%	0,0139	0,0106	0,0476

Tabela 4-19 Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade de cada grupo de provetes

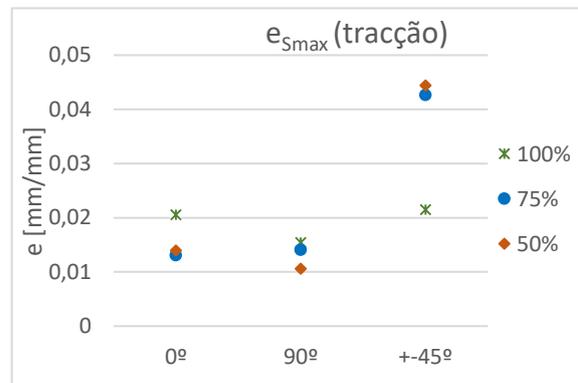
E	0°	90°	$\pm 45^\circ$
100%	3293,3	2684,7	2782,4
75%	2585,4	823,0	1410
50%	2113,3	631,1	1117,1

Tabela 4-20 Comparação dos valores médios do coeficiente de Poisson de cada grupo de provetes

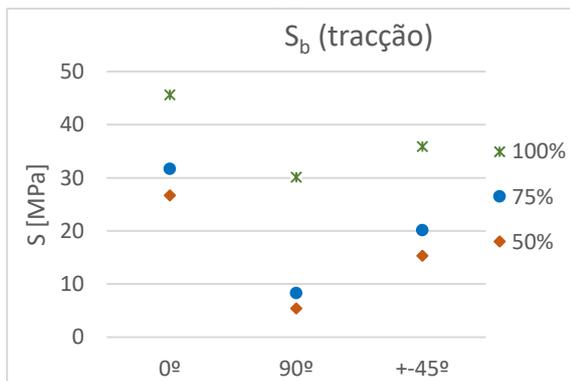
ν	0°	90°	$\pm 45^\circ$
100%	0,349	0,359	0,310
75%	0,328	0,164	0,393
50%	0,332	0,142	0,481



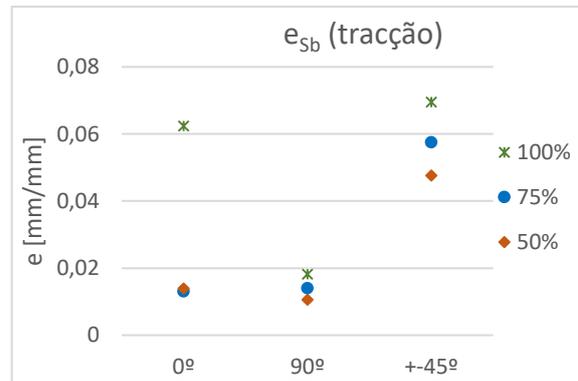
(a)



(b)



(c)



(d)

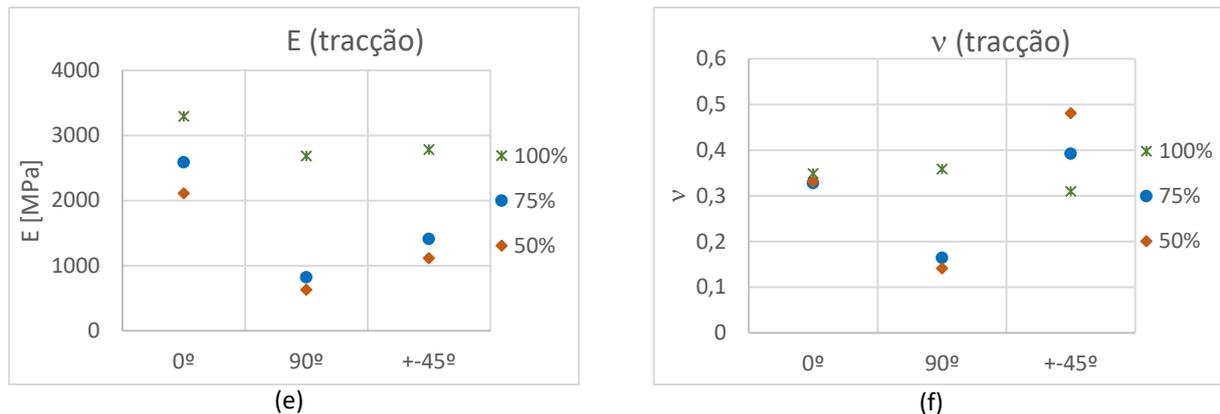


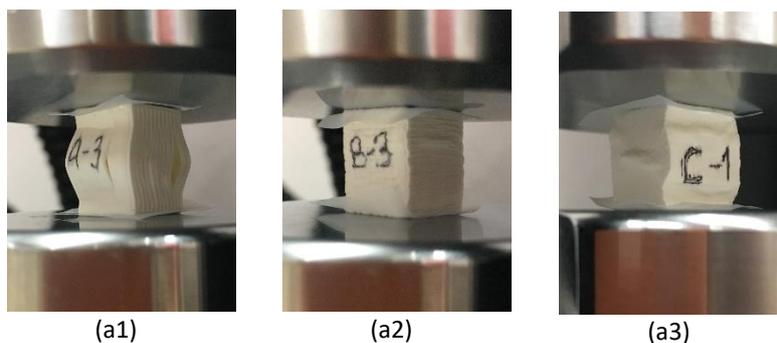
Figura 4-29 Representação gráfica dos valores médios das propriedades à tracção de cada grupo de provetes: (a) Tensão máxima; (b) Extensão no ponto de tensão máxima; (c) Tensão na fractura; (d) Extensão na fractura; (e) Módulo de elasticidade; (f) Coeficiente de Poisson

A análise destes resultados mostra que, em algumas propriedades, como por exemplo a extensão no ponto de carga máxima e o coeficiente de Poisson, os provetes com 50% e com 75% de enchimento apresentam valores semelhantes, apesar da diferença de densidade das estruturas.

As propriedades obtidas dos provetes com 0° continuam a apresentar, em geral, valores mais elevados do que as mesmas propriedades dos provetes impressos nas restantes direcções. Apesar de nos provetes com percentagem de enchimento de 100% a tendência de variação ser mantida nas diferentes direcções, no caso das percentagens de enchimento de 50% e 75% os valores mais elevados de extensão e do coeficiente de Poisson verificam-se nos provetes impressos a 45° . A diferença ao nível das extensões de fratura deve-se ao facto de tanto os provetes de 0° como de 90° terem fracturado pouco depois de ser atingida a carga máxima. No caso de 100% de enchimento, os provetes de 0° atingiram níveis de deformação semelhantes aos de $\pm 45^\circ$.

4.3.2. Ensaios de compressão uniaxial

As figuras 4-32 e 4-33 mostram as curvas nominais de tensão-extensão obtidas nos ensaios de compressão uniaxial dos provetes impressos com 50% e 75% de enchimento. Importa salientar que durante a realização destes ensaios se atingiram condições de deformação não uniforme devido a fenómenos de instabilidade e de separação de camadas pouco depois do ponto máximo das curvas, conforme mostrado na figura 4-30.



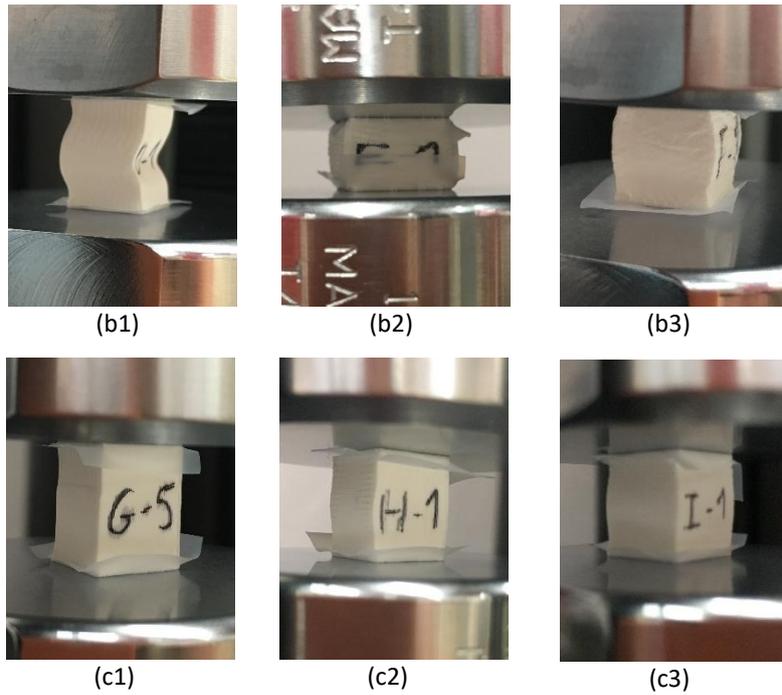


Figura 4-30 Instantes de deformação não homogênea dos provetes: (a1)-(a3) provetes com 50% de enchimento; (b1)-(b3) provetes com 75% de enchimento; (c1)-(c3) provetes com 100% de enchimento

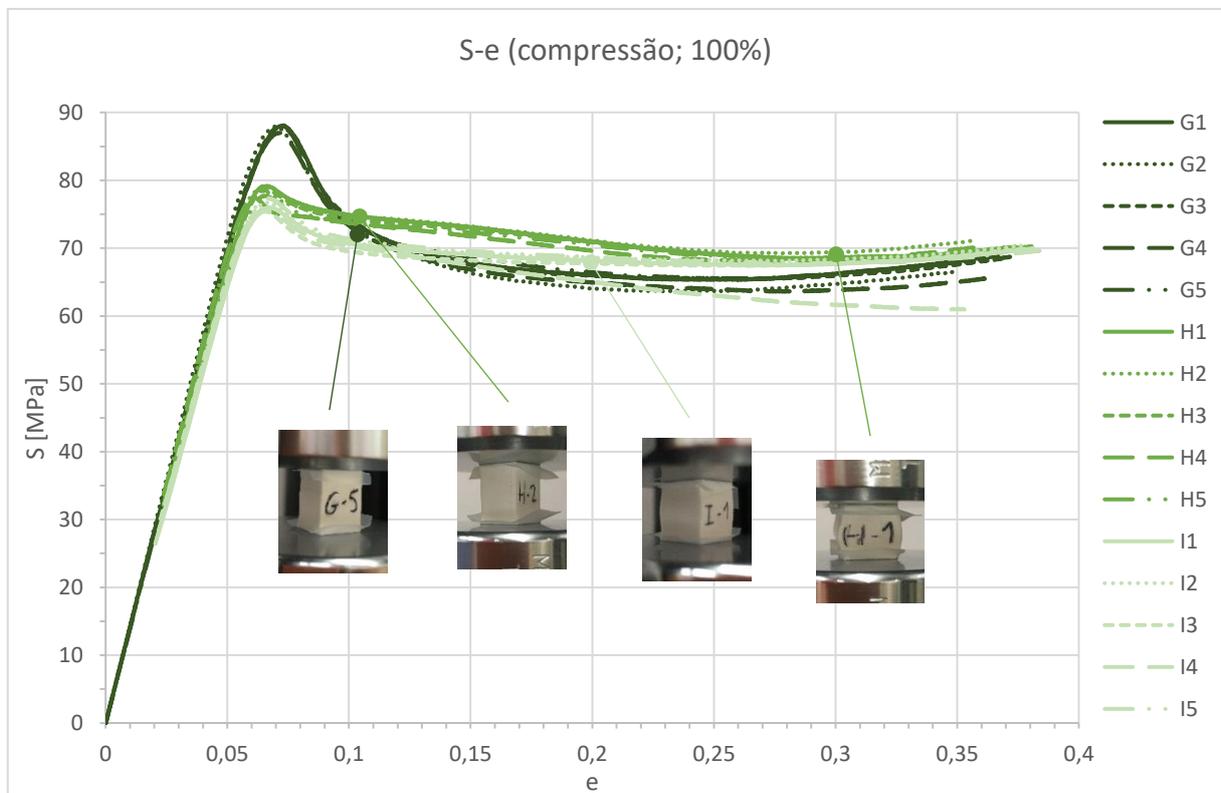


Figura 4-31 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 100% de enchimento

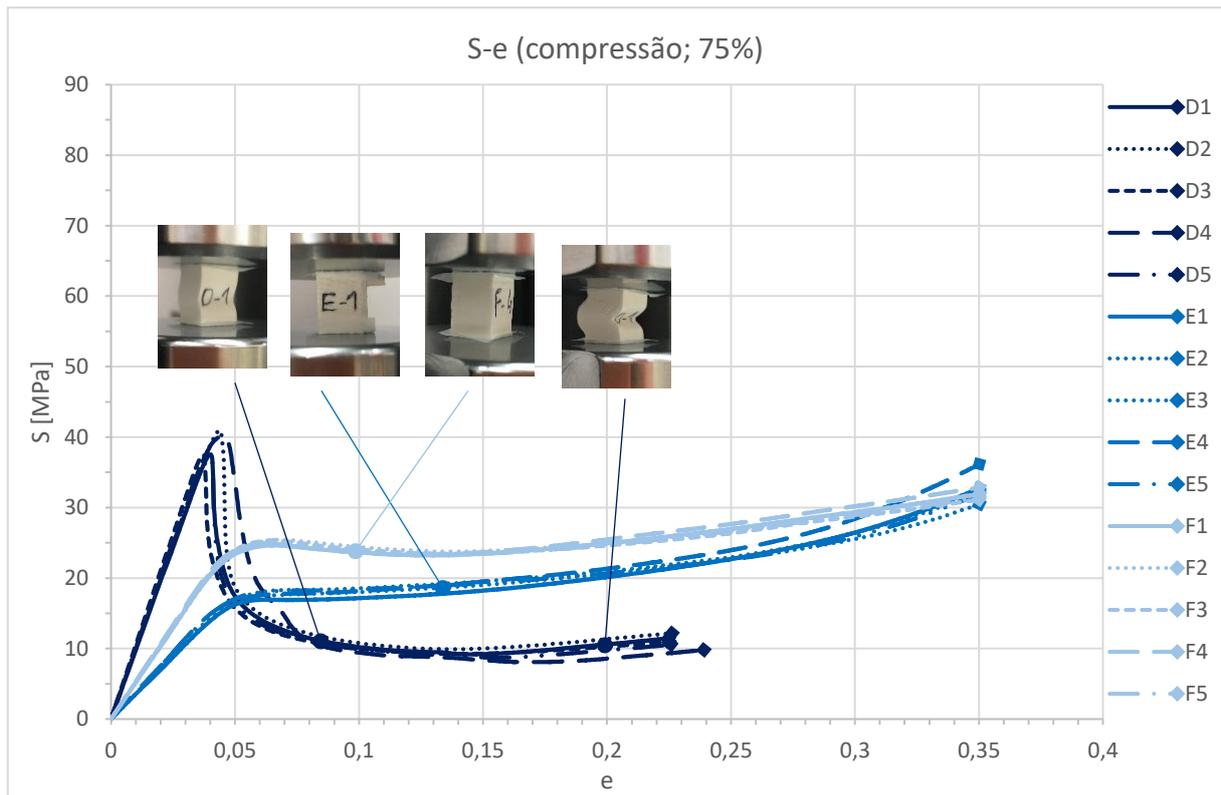


Figura 4-32 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 75% de enchimento

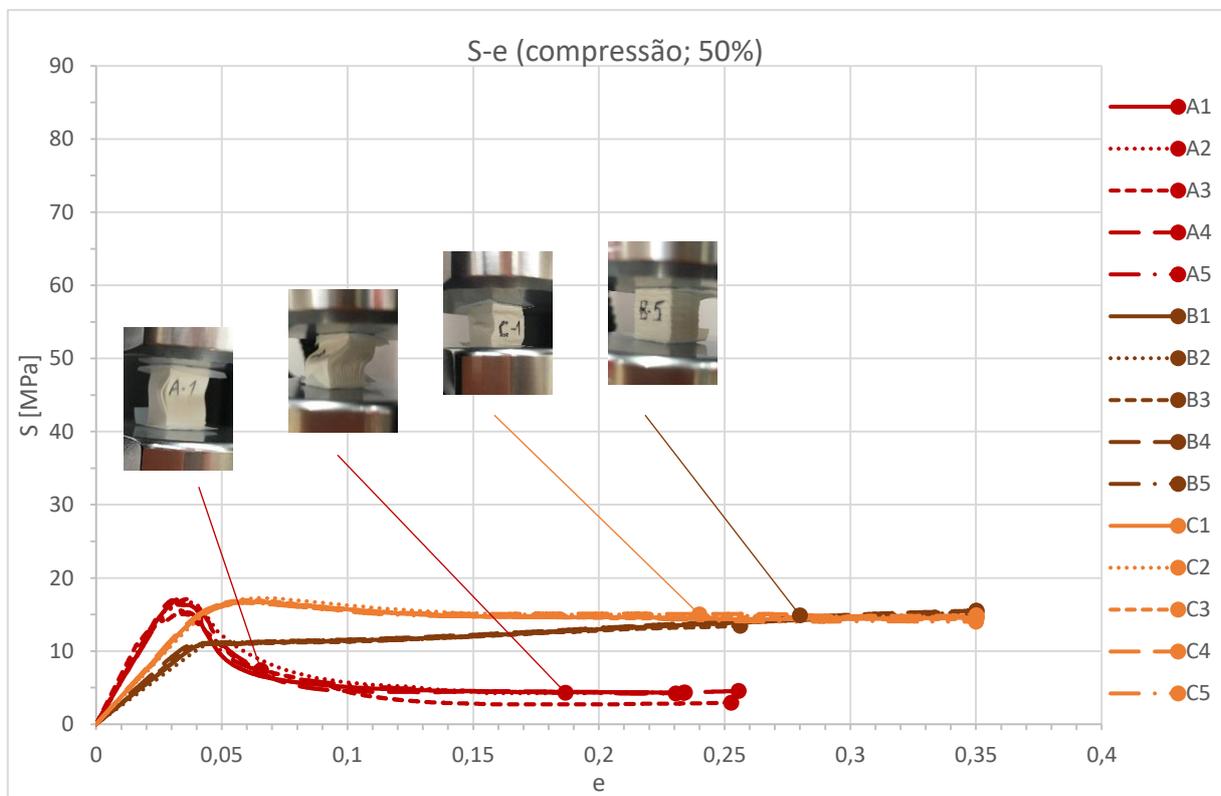


Figura 4-33 Curvas nominais tensão-extensão dos provetes de compressão de todas as orientações de impressão com 50% de enchimento

É ainda importante referir ainda que estas curvas foram alvo de correção por forma a eliminar o efeito inicial não linear, de adaptação das estruturas impressas aos pratos de compressão, conforme indicado na norma ASTM 695 que diz respeito ao início não linear. Este procedimento foi igualmente utilizado no tratamento das curvas de compressão dos provetes densos apresentadas numa secção anterior (figuras 4-18 e 4-20).

A evolução das curvas tensão extensão nominais dos provetes das Figuras 4-31 a 4-33 (que também ilustram alguns instantes dos ensaios de compressão) apresentam a tendência expectável de crescimento da resistência mecânica com o aumento da percentagem de enchimento. A maioria das curvas apresenta o amaciamento com a deformação já analisado anteriormente, repetindo-se também o facto deste amaciamento, que pode ser quantificado pelo declive da queda da curva, após o pico de tensão máxima, ser maior nos provetes impressos a 0° do que nas restantes orientações, qualquer que seja a percentagem de enchimento considerada.

Algumas das curvas nominais de tensão-extensão destes provetes não apresentam um verdadeiro máximo local, o que dificulta a definição da tensão máxima e a sua comparação com os resultados dos restantes ensaios. As tabelas 4-21 – 4-23 possibilitam a confrontação dos valores de algumas propriedades obtidas destes ensaios para cada uma das percentagens de enchimento e orientações consideradas. As figuras 4-34 permitem visualizar graficamente os valores referidos anteriormente.

Tabela 4-21 Comparação dos valores médios de tensão máxima de cada grupo de provetes

S_{ced}			
	0°	90°	±45°
100%	87,774	78,316	76,250
75%	38,810	-	25,035
50%	16,545	11,081	16,834

Tabela 4-22 Comparação dos valores médios de extensão no ponto de tensão máxima de cada grupo de provetes

e_{ced}			
	0°	90°	±45°
100%	0,0719	0,0643	0,0659
75%	0,0409	-	0,0658
50%	0,0338	0,0494	0,0616

Tabela 4-23 Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade de cada grupo de provetes

E	0°	90°	±45°
100%	1399,3	1359,7	1307,6
75%	1000,8	364,2	522,7
50%	607,2	279,9	371,5

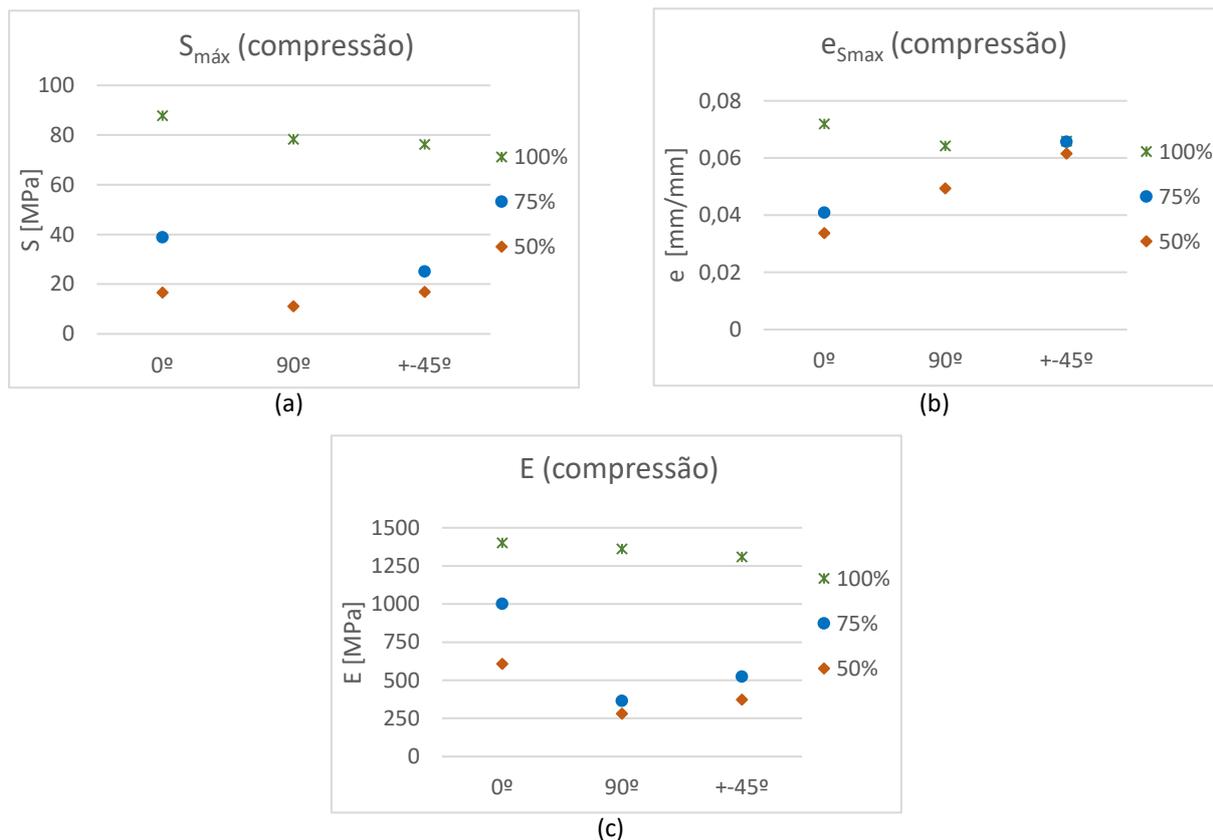


Figura 4-34 Representa\~ao gr\~afica dos valores m\~edios das propriedades \~a compress\~ao de cada grupo de provetes: (a) Tens\~ao m\~axima; (b) Extens\~ao no ponto de tens\~ao m\~axima; (c) M\~odulo de elasticidade

Importa refor\~car que as propriedades aqui analisadas dizem respeito \~a estrutura, n\~ao sendo caracter\xedsticas do material uma vez que, no caso dos provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100%, o seu interior cont\~em espa\~cos vazios que fazem com que a \~area de sec\~c\~ao resistente seja inferior \~a \~area da sec\~c\~ao exterior que foi utilizada para os c\~alculos dos valores nominais.

Por este motivo, com o objectivo de avaliar o verdadeiro estado de sollicita\~ao do material e de o comparar com os resultados obtidos relativos aos provetes densos, apresenta-se de seguida uma an\~alise que inclui a correc\~c\~ao da \~area real da sec\~c\~ao resistente para o c\~alculo dos valores nominais.

Na fase de constru\~c\~ao optou-se por incluir um contorno exterior em cada camada, que se assemelha a uma "moldura" em torno do preenchimento. A correc\~c\~ao da sec\~c\~ao resistente real foi efetuada tendo em conta n\~ao s\~o a percentagem de \~area correspondente \~as condi\~c\~oes de preenchimento, como tamb\~em a \~area associada a este contorno exterior. Sabendo que o contorno

exterior tem uma largura de 0,4mm, a área correspondente à “moldura” de cada provete foi calculada do seguinte modo:

$$A_{moldura} = (l_1 \times l_2) - ((l_1 - 0,8) \times (l_2 - 0,8)) \text{ mm}^2 \quad (4.7)$$

onde l_1 e l_2 são as dimensões medidas em cada um dos lados da secção exterior dos provetes.

Sabendo que a área correspondente ao preenchimento resulta da diferença entre a área total e a área dos contornos,

$$A_{interior_c} = A_T - A_{moldura} \text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

a área da secção resistente pode ser calculada através da ponderação destas duas componentes:

$$A_{secção_resistente} = A_{moldura} + \%_{enchimento} \times A_{interior} \quad (4.9)$$

Depois de determinadas as áreas das secções resistentes de cada provete, efectuou-se a correcção dos valores de tensão nominal dos ensaios de compressão de estruturas impressas com 50% e 75% de enchimento, tendo-se obtido as curvas nominais representadas na figura 4-35.

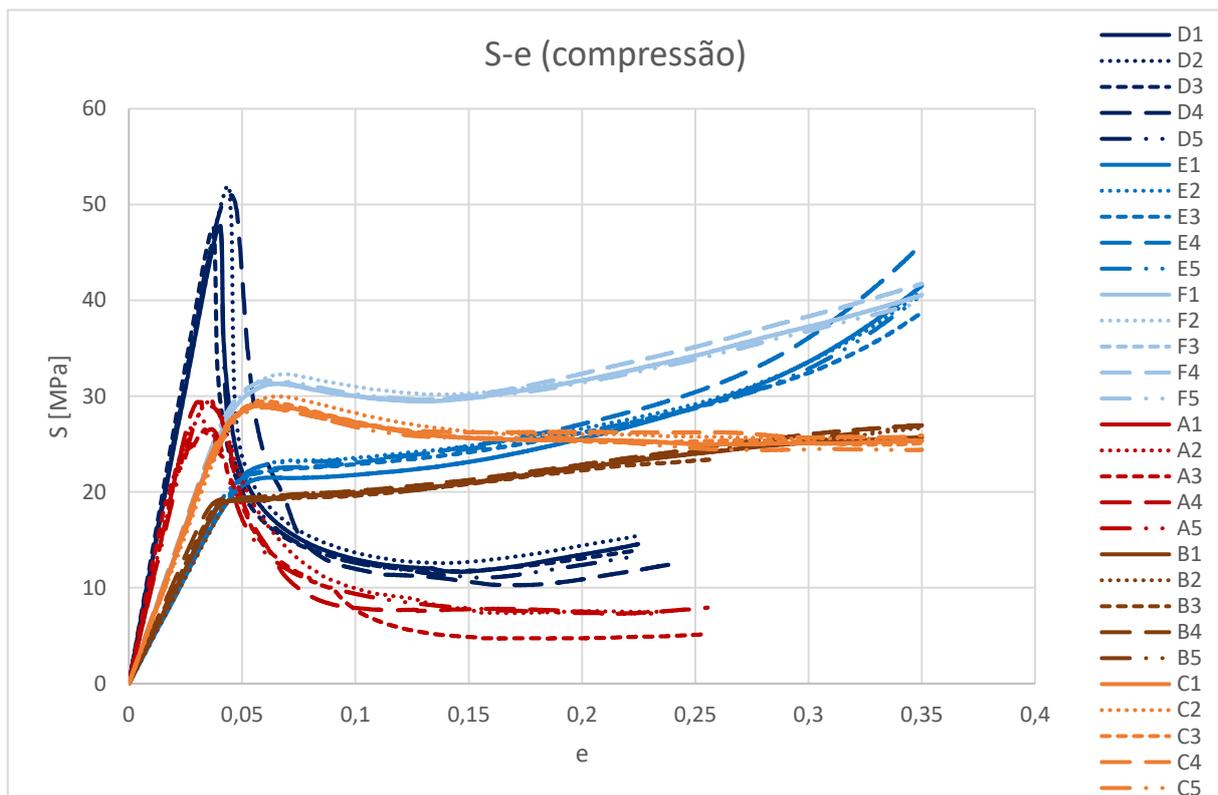


Figura 4-35 Curvas nominais tensão-extensão corrigidas

A utilização da área corrigida origina um aumento dos valores de tensão, como seria expectável, que é mais acentuado quanto menor a percentagem de enchimento. No entanto, este aumento não é suficiente para aproximar estes valores dos obtidos no caso dos provetes densos, tal como ilustrado na figura 4-36. Na figura não é possível denotar o aumento no caso da orientação de 90° com 75% de enchimento uma vez que, tal como já tinha sido revelado anteriormente, não foi possível determinar o máximo desta curva.

Esta correcção não afectou significativamente o andamento das curvas e a tendência de aumento de tensão com o aumento da percentagem de enchimento continua a fazer-se notar, no entanto, as curvas das orientações 90° e $\pm 45^\circ$ estão relativamente próximas, não sendo esta influência da densidade tão acentuada como anteriormente. Nas curvas de 0° a diferença entre percentagens continua a ser significativa, com os provetes com 75% de enchimento a evidenciarem valores máximos de tensão bastante superiores aos de 50%.

O facto de os valores de tensão não se aproximarem dos valores obtidos em provetes densos pode dever-se ao modo de deformação de cada geometria com percentagens de enchimento de 50% e 75%, uma vez que cada provete apresenta espaços vazios no seu interior que permitem modos de deformação durante a compressão diferentes dos provetes densos.

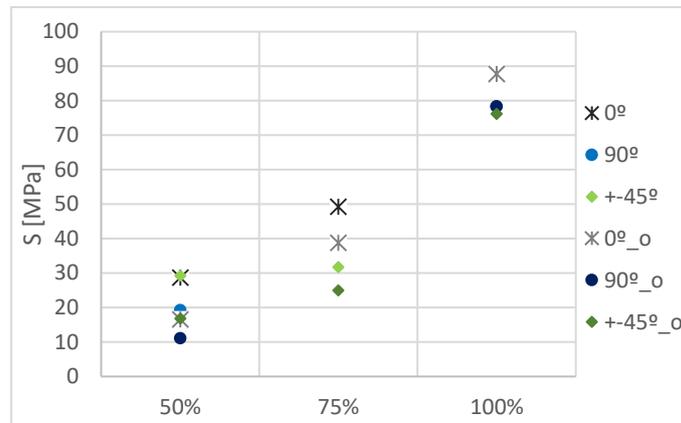


Figura 4-36 Representação gráfica da variação obtida com a correcção

5. Conclusão e Perspectivas de Trabalho Futuro

Este capítulo pretende sumarizar as etapas realizadas e fazer um balanço deste trabalho experimental, resumindo também algumas das principais conclusões. Para além disso, pretende ainda apresentar sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho experimental propunha-se a analisar o comportamento mecânico de estruturas produzidas a partir do processo FDM. Este tipo de processo de fabrico tem a si associada uma imensa variedade de parâmetros que influenciam directamente as características e as propriedades mecânicas da peça construída. De entre estes parâmetros, foram seleccionados dois para que fosse aferida a sua influência no comportamento mecânico das estruturas impressas, sendo eles a percentagem de enchimento e o ângulo de deposição dos filamentos. Para cada um deles foram definidos três níveis de variação: valores de 50%, 75% e 100% para a percentagem de enchimento; e orientações de 0°, 90° e $\pm 45^\circ$ para o ângulo de deposição. Foi ainda estabelecido que seria avaliado o comportamento das estruturas sob dois tipos de sollicitação, tracção e compressão, realizando ensaios quase-estáticos e também cíclicos.

Tendo definido o plano de ensaios, procedeu-se à impressão dos provetes. Para cada combinação de percentagem de enchimento e ângulo de deposição foram impressos provetes de tracção e provetes de compressão. As dimensões dos provetes de tracção, bem como as características do ensaio, foram as estabelecidas na norma ASTM D 638. Os ensaios de compressão foram realizados de acordo com a norma ASTM D 695, no entanto, ensaios preliminares mostraram que a força disponibilizada pela máquina não era suficiente para deformar a geometria indicada. Assim, foi definida uma geometria alternativa para os provetes de compressão, optando-se por uma geometria paralelepípedica de base quadrangular e com uma relação de altura de 1,5. Todos os provetes foram impressos com um contorno exterior e, no caso dos provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100%, com duas camadas densas no topo e na base. Todos os restantes parâmetros foram mantidos constantes.

Antes dos ensaios, determinou-se a densidade de todos os provetes de compressão recorrendo ao princípio de Arquimedes. Concluiu-se que, tomando a densidade dos provetes densos como referência, a densidade dos provetes com 75% corresponde a aproximadamente 75% desta. No caso dos provetes com 50% de enchimento, a densidade era ligeiramente superior à densidade de referência.

As medições necessárias para a determinação da densidade permitiram ainda calcular o volume de cada um dos provetes. Este procedimento foi realizado antes e depois do ensaio, o que permitiu avaliar a variação de volume ocorrida durante o mesmo. No caso dos provetes com densidade de enchimento menor que 100% esta variação foi, logicamente, bastante significativa. No caso dos provetes densos, a variação foi pouco relevante. Assim, assumindo a hipótese de incompressibilidade no caso dos provetes densos, foram calculados os valores verdadeiros de tensão e extensão. Não foi possível fazer a mesma análise no caso dos provetes de tracção. Ainda assim, assumiu-se que os resultados obtidos anteriormente se aplicavam também neste caso e, assim, foram traçadas as curvas tensão-extensão verdadeiras dos provetes de tracção com densidade de enchimento de 100%.

As curvas obtidas revelaram um comportamento semelhante ao comportamento típico dos polímeros referido na bibliografia. Foram identificadas diversas fases da deformação, em particular, foi definida a localização aproximada da transição do regime linear para o regime não linear nas curvas de tracção. Esta identificação foi possível recorrendo à análise dos ensaios cíclicos, a partir dos quais foi possível determinar em que ponto a componente viscoelástica da deformação começava a tomar valores significativos e, portanto, a curva iniciava a não-linearidade.

Foi também observada a ocorrência de amaciamento após o ponto de tensão máxima. O andamento da curva registada foi ainda comparado com o andamento da força necessária para a deformação caso o único factor determinante fosse a variação de área ocorrida nos provetes. Concluiu-se que, tanto o amaciamento como a dependência da variação da área variam consoante a direcção analisada. No caso da tracção, os provetes de 0° revelaram ser aqueles nos quais o amaciamento era maior e, a partir de determinado ponto, o andamento da sua curva era semelhante ao da força calculada, sugerindo assim que a partir de determinado instante a variação de área era, de facto, o factor determinante. Os provetes de 90° partiram de forma frágil, com a fractura a ocorrer prematuramente entre filamentos. Os provetes de $\pm 45^\circ$ apresentaram um comportamento intermédio e as suas curvas sugeriram que, naquele caso, a deformação era governada pela variação de área desde a ocorrência do ponto máximo, sendo o amaciamento quase inexistente.

No caso dos provetes de compressão, e ao contrário do que tinha sucedido no caso de tracção, as curvas verdadeiras apresentavam diferenças significativas relativamente às curvas nominais. No entanto, assume-se que o comportamento das primeiras pode estar a ser erradamente influenciado pelo modo de deformação dos provetes, que instabilizam pouco depois de ser atingido o primeiro ponto de tensão máxima. Esta instabilidade foi ainda associada ao andamento decrescente da força registada, quando comparada com a tendência crescente da força devida à variação de área.

As curvas registadas para os casos de provetes com percentagens de enchimento inferiores a 100% representam o comportamento geral da estrutura e não a resistência do material, uma vez que a área nominal utilizada para o cálculo da tensão não corresponde à área realmente disponível para resistir à deformação. Assim, os valores de tensão obtidos nos ensaios de compressão destes provetes foram corrigidos com base no cálculo daquela que seria, aproximadamente, a área resistente. Os resultados mostraram que, ainda assim, os valores de tensão máxima suportados pelo material se mantiveram relativamente longe dos valores suportados no caso dos provetes densos, algo que pode eventualmente ser atribuído à influência que os espaços vazios no interior dos provetes têm no seu comportamento.

De forma a dar continuidade ao estudo nesta área, apresentam-se de seguida algumas sugestões para trabalhos futuros:

- De forma a contabilizar a influência de cada uma das componentes da deformação, examinar as curvas obtidas através de uma análise das energias envolvidas no processo;
- Realizar cortes nos provetes após o seu ensaio de modo a observar a estrutura interior para tentar compreender com mais detalhe a forma como decorreu a deformação;
- Registrar em forma de vídeo os ensaios realizados, com o mesmo objectivo de tentar analisar com maior precisão a deformação dos provetes e a ocorrência de instabilidade;

- Medição das extensões com recurso a vídeo-extensometria de forma a determinar com maior rigor os valores verdadeiros de tensão e extensão

Bibliografia

- [1] Dizon, John Ryan C., et al. "Mechanical characterization of 3D-printed polymers." *Additive Manufacturing* 20 (2018): 44-67.
- [2] Ngo, Tuan D., et al. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges." *Composites Part B: Engineering* 143 (2018): 172-196.
- [3] Wong, Kaufui V., and Aldo Hernandez. "A review of additive manufacturing." *ISRN Mechanical Engineering* 2012 (2012).
- [4] Guo, Nannan, and Ming C. Leu. "Additive manufacturing: technology, applications and research needs." *Frontiers of Mechanical Engineering* 8.3 (2013): 215-243.
- [5] Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed (Consultado em Agosto 2019)
- [6] ISO/ASTM 52900-15 (2015). "Standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology."
- [7] Fernandez-Vicente, Miguel, Miquel Canyada, and Andres Conejero. "Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers." *International Journal of Rapid Manufacturing* 5.1 (2015): 116-128.
- [8] Ahn, Sung-Hoon, et al. "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS." *Rapid prototyping journal* 8.4 (2002): 248-257.
- [9] What is g-code? ultimaker.com/en/resources/39071-what-is-g-code (Consultado em Agosto de 2019)
- [10] Gcode flavours: Reprap vs. UltiGCode. ultimaker.com/en/resources/20996-gcode-flavours-reprap-vs-ultigcode (Consultado em Agosto de 2019)
- [11] Cantrell, Jason T., et al. "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts." *Rapid Prototyping Journal* 23.4 (2017): 811-824.
- [12] Steuben, John, Douglas L. Van Bossuyt, and Cameron Turner. "Design for fused filament fabrication additive manufacturing." *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [13] Qattawi, Ala, Buraaq Alrawi, and Arturo Guzman. "Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach." *Procedia Manufacturing* 10 (2017): 791-803.
- [14] Chacón, J. M., et al. "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection." *Materials & Design* 124 (2017): 143-157.
- [15] Domingo-Espin, Miquel, et al. "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts." *Materials & Design* 83 (2015): 670-677.
- [16] Bellini, Anna, and Selçuk Güçeri. "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling." *Rapid Prototyping Journal* 9.4 (2003): 252-264.

- [17] Casavola, Caterina, et al. "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory." *Materials & design* 90 (2016): 453-458.
- [18] Song, Yichi, et al. "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA." *Materials & Design* 123 (2017): 154-164.
- [19] Kuznetsov, Vladimir, et al. "Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process." *Polymers* 10.3 (2018): 313.
- [20] Torres, Jonathan, et al. "Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives." *Jom* 67.5 (2015): 1183-1193.
- [21] Akhoundi, B., and A. H. Behraves. "Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products." *Experimental Mechanics* (2019): 1-15.
- [22] Wittbrodt, Ben, and Joshua M. Pearce. "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components." *Additive Manufacturing* 8 (2015): 110-116.
- [23] Lubombo, Christian, and Michel A. Huneault. "Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts." *Materials Today Communications* 17 (2018): 214-228.
- [24] Brenken, Bastian, et al. "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review." *Additive Manufacturing* 21 (2018): 1-16.
- [25] Tanikella, Nagendra G., Ben Wittbrodt, and Joshua M. Pearce. "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing." *Additive Manufacturing* 15 (2017): 40-47.
- [26] Kim, Eunseob, Yong-Jun Shin, and Sung-Hoon Ahn. "The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: fused deposition modeling." *Rapid Prototyping Journal* 22.6 (2016): 887-894.
- [27] History of Plastics. plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics/history (Consultado em Agosto de 2019)
- [28] Lifecycle of a Plastic Product. plastics.americanchemistry.com/Lifecycle-of-a-Plastic-Product/ (Consultado em Agosto de 2019)
- [29] Ward, Ian M., and John Sweeney. *Mechanical properties of solid polymers*. John Wiley & Sons, 2012.
- [30] Jones, David RH, and Michael F. Ashby. *Engineering materials 2: an introduction to microstructures, processing and design*. Elsevier, 2005.
- [31] Engels, Tom AP, et al. "Time-dependent failure of amorphous polylactides in static loading conditions." *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 21.1 (2010): 89-97.
- [32] Grellmann, Wolfgang. *Polymer testing*. Ed. Sabine Seidler. Munich: Hanser, 2007.
- [33] Van Melick, H. G. H., et al. "The influence of intrinsic strain softening on the macroscopic deformation behaviour of amorphous polymers." *Proceedings of the 15th annual meeting of Polymer Processing Society, 's-Hertogenbosch, The Netherlands' p10*. 1999.
- [34] Glassy Polymer. link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-40872-4_270-1 (Consultado em Outubro 2019)

- [35] Chen, Kang, and Kenneth S. Schweizer. "Theory of yielding, strain softening, and steady plastic flow in polymer glasses under constant strain rate deformation." *Macromolecules* 44.10 (2011): 3988-4000.
- [36] Miehe, Ch, S. Göktepe, and J. Méndez Diez. "Finite viscoplasticity of amorphous glassy polymers in the logarithmic strain space." *International Journal of Solids and Structures* 46.1 (2009): 181-202.
- [37] Ahmed, Jasim, and Sunil K. Varshney. "Polylactides—chemistry, properties and green packaging technology: a review." *International journal of food properties* 14.1 (2011): 37-58.
- [38] Farah, Shady, Daniel G. Anderson, and Robert Langer. "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review." *Advanced drug delivery reviews* 107 (2016): 367-392.
- [39] Stereoisomers definition. goldbook.iupac.org/terms/view/S05984 (Consultado em Agosto de 2019)
- [40] Bergstroem, Joergen S., and Danika Hayman. "An overview of mechanical properties and material modeling of polylactide (PLA) for medical applications." *Annals of biomedical engineering* 44.2 (2016): 330-340.
- [41] Ultimaker, Technical data sheet PLA
ultimaker.com/download/74970/UM180821%20TDS%20PLA%20RB%20V11.pdf (Consultado em Agosto de 2019)
- [42] Anderson, Isabelle. "Mechanical properties of specimens 3d printed with virgin and recycled polylactic acid." *3D Printing and Additive Manufacturing* 4.2 (2017): 110-115.
- [43] Tymrak, B. M., Megan Kreiger, and Joshua M. Pearce. "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions." *Materials & Design* 58 (2014): 242-246.
- [44] Site do fabricante da impressora. ultimaker.com/ (Consultado em Agosto 2019)
- [45] Ultimaker, Ficha de especificações da impressora
ultimaker.com/download/21471/Ultimaker%203%20Extended%20specification%20sheet.pdf
(Consultado em Agosto 2019)
- [46] Site do fabricante da máquina instron.
instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/5900-series/5960-dual-column (Consultado em Outubro 2019)

Anexos

Anexo A

A1 - Valores nominais dos ensaios de tracção uniaxiais

S_{máx}			
	0°	90°	±45°
1	55,216	29,594	40,463
2	54,012	29,775	40,377
3	55,333	31,326	41,039
4	55,308	31,363	40,838
5	54,936	30,538	40,811
Média	54,961	30,519	40,706
Desvio-padrão	0,553	0,833	0,277

eS_{máx}			
	0°	90°	±45°
1	0,0207	0,0150	0,0215
2	0,0199	0,0156	0,0215
3	0,0207	0,0155	0,0216
4	0,0206	0,0153	0,0216
5	0,0208	0,0157	0,0214
Média	0,0206	0,0154	0,0215
Desvio-padrão	0,0004	0,0003	0,00009

S_b			
	0°	90°	±45°
1	45,071	29,489	35,333
2	44,958	29,576	36,602
3	45,753	30,618	35,696
4	46,575	30,726	34,912
5	45,781	29,964	36,924
Média	45,628	30,075	35,893
Desvio-padrão	0,651	0,575	0,849

e_b			
	0°	90°	±45°
1	0,0799	0,0158	0,0720
2	0,0499	0,0165	0,0609
3	0,0743	0,0204	0,0684
4	0,0546	0,0195	0,0688
5	0,0533	0,0193	0,0775
Média	0,0624	0,0183	0,0695
Desvio-padrão	0,0137	0,0020	0,0061

E			
	0°	90°	±45°
1	3316,8	2670,7	2826,7
2	3308,8	2632,1	2765,3
3	3299,5	2795,8	2808,7
4	3326,6	2692,8	2774,7
5	3214,8	2632,3	2736,5
Média	3293,30	2684,74	2782,38
Desvio-padrão	45,006	67,300	35,752

v			
	0°	90°	±45°
1	0,341	0,370	0,289
2	0,354	0,353	0,326
3	0,348	0,357	0,318
4	0,358	0,358	0,314
5	0,344	0,357	0,302
Média	0,349	0,359	0,310
Desvio-padrão	0,0072	0,0066	0,0145

A2 - Valores verdadeiros dos ensaios de tracção uniaxiais

$\sigma_{\text{máx}}$			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	56,361	30,038	41,344
2	55,088	30,239	41,268
3	56,480	31,815	41,930
4	56,446	31,846	41,727
5	56,080	31,021	41,700
Média	56,091	30,992	41,594
Desvio-padrão	0,582	0,849	0,279

$\epsilon_{\text{máx}}$			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	0,0205	0,0149	0,0222
2	0,0197	0,0155	0,0222
3	0,0205	0,0158	0,0218
4	0,0204	0,0156	0,0218
5	0,0206	0,016	0,0221
Média	0,0203	0,0156	0,0220
Desvio-padrão	0,0004	0,0004	0,0002

σ_b			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	48,674	29,954	37,878
2	47,201	30,063	38,830
3	49,151	31,243	38,136
4	49,117	31,325	37,315
5	48,223	30,541	39,786
Média	48,473	30,625	38,389
Desvio-padrão	0,805	0,641	0,952

εb			
	0°	90°	±45°
1	0,0769	0,0156	0,0695
2	0,0487	0,0163	0,0591
3	0,0716	0,0202	0,0661
4	0,0531	0,0193	0,0666
5	0,0520	0,0191	0,0747
Média	0,0605	0,0181	0,067199
Desvio-padrão	0,0128	0,0020	0,0057

E			
	0°	90°	±45°
1	3332,2	2683,9	2839,7
2	3325,1	2644,4	2778,1
3	3314,8	2809	2821,4
4	3340,5	2705,1	2787,3
5	3231,5	2644,5	2748,7
Média	3308,82	2697,38	2795,04
Desvio-padrão	44,242	67,645	35,999

v			
	0°	90°	±45°
1	0,341	0,369	0,289
2	0,354	0,353	0,327
3	0,348	0,357	0,319
4	0,359	0,359	0,314
5	0,344	0,357	0,302
Média	0,349	0,359	0,310
Desvio-padrão	0,0073	0,0060	0,0149

Anexo B

B1 - Valores nominais dos ensaios de compressão uniaxiais

S_{máx}			
	0°	90°	±45°
1	88,049	79,158	76,003
2	87,911	78,661	76,713
3	88,103	78,582	75,677
4	86,981	77,454	75,490
5	87,827	77,727	77,365
Média	87,774	78,316	76,250
Desvio-padrão	0,457	0,705	0,778

e_{S_{máx}}			
	0°	90°	±45°
1	0,0732	0,0660	0,0672
2	0,0700	0,0633	0,0664
3	0,0725	0,0661	0,0634
4	0,0714	0,0609	0,0654
5	0,0726	0,0652	0,0671
Média	0,0719	0,0643	0,0659
Desvio-padrão	0,0012	0,0022	0,0016

E			
	0°	90°	±45°
1	1380,69	1344,03	1287
2	1437,61	1388,15	1316,59
3	1396,93	1340,8	1325,06
4	1399,13	1401,42	1294,8
5	1382,3	1323,88	1314,52
Média	1399,332	1359,656	1307,594
Desvio-padrão	22,9599	33,30084	15,98247

B2 - Valores verdadeiros dos ensaios de compressão uniaxiais

$\sigma_{\text{máx}}$			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	81,678	74,029	70,941
2	81,792	73,681	71,668
3	81,754	73,459	70,882
4	80,842	72,740	70,563
5	81,492	72,681	72,206
Média	81,512	73,318	71,252
Desvio-padrão	0,392	0,591	0,669

$\epsilon_{\text{máx}}$			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	0,0737	0,0668	0,0688
2	0,0721	0,0654	0,0679
3	0,0737	0,0670	0,0655
4	0,0726	0,0628	0,0675
5	0,0746	0,0667	0,0687
Média	0,0733	0,0658	0,0677
Desvio-padrão	0,0010	0,0018	0,0014

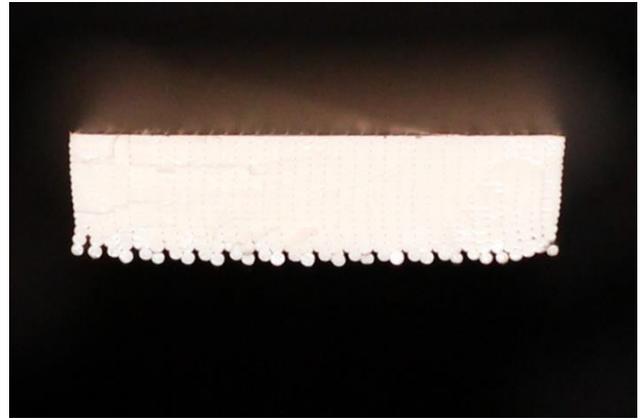
E			
	0°	90°	$\pm 45^\circ$
1	1271,5	1213	1178,7
2	1309,2	1248,6	1190,7
3	1280,7	1208,4	1202,1
4	1274	1264,8	1179,1
5	1252,2	1185,5	1179,8
Média	1277,52	1224,06	1186,08
Desvio-padrão	20,637	32,080	10,254

Anexo C

C1 – Superfícies de fractura dos provetes de tracção com 100% de enchimento



0°



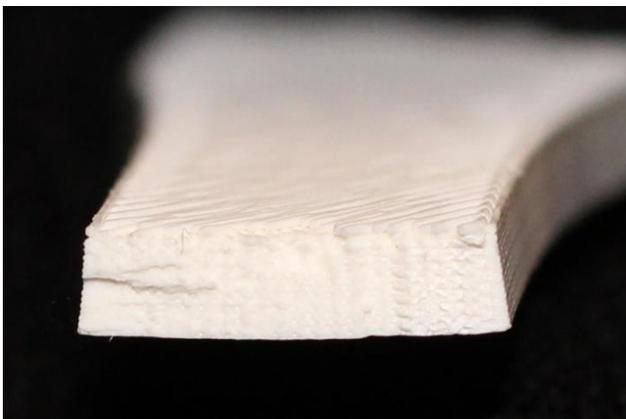
0°



90°



90°

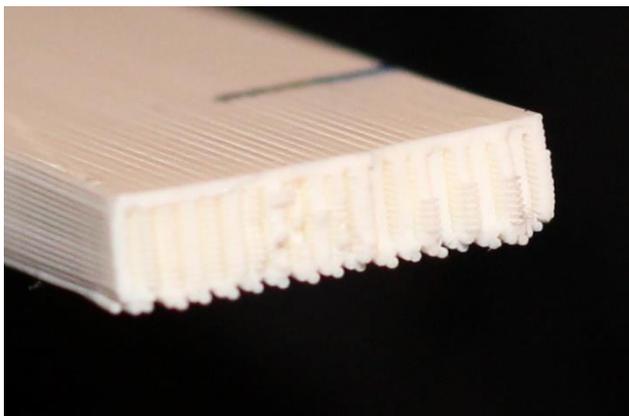


±45°

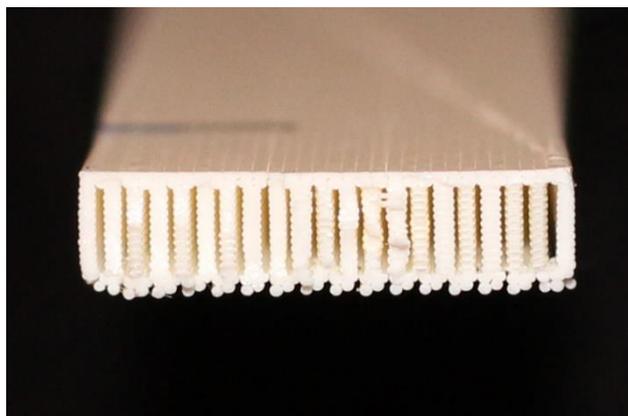


±45°

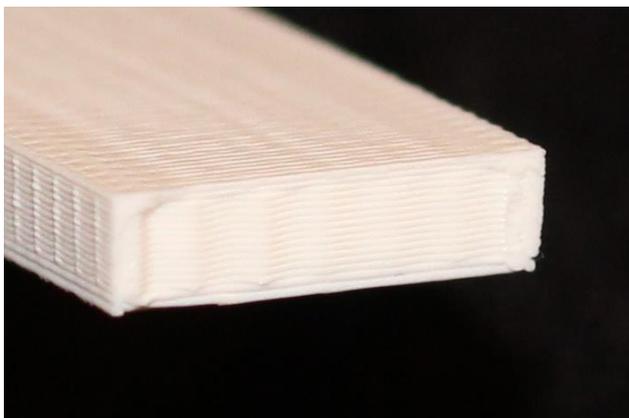
C2 - Superfícies de fractura dos provetes de tracção com 75% de enchimento



0°



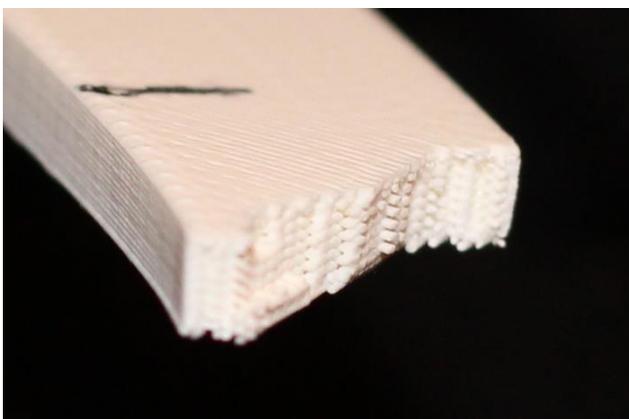
0°



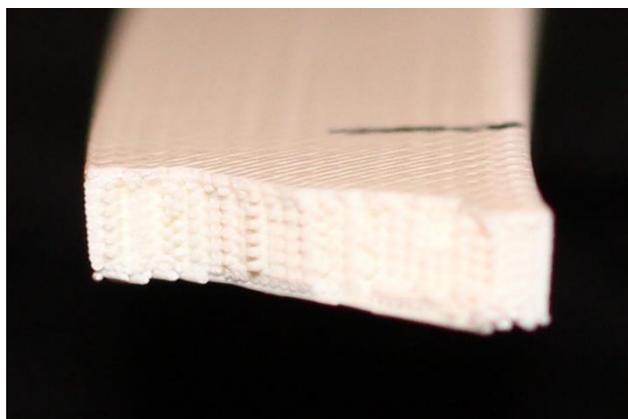
90°



90°

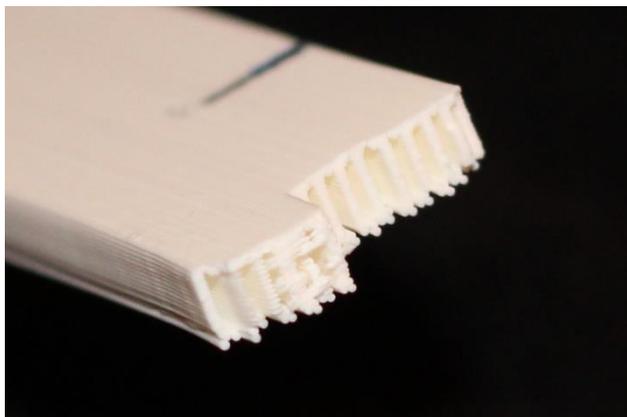


±45°

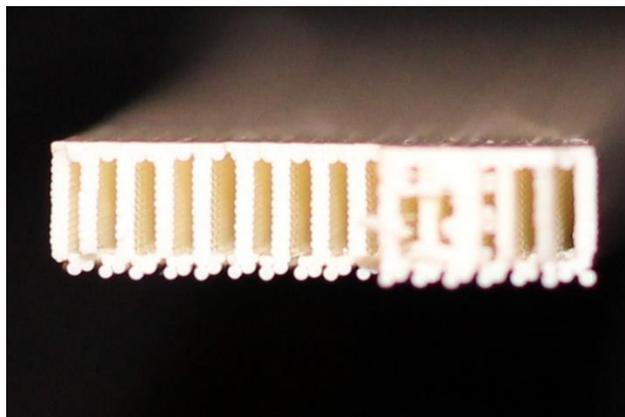


±45°

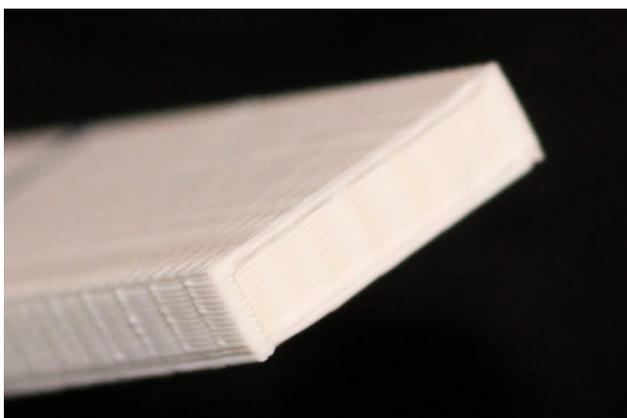
C3 - Superfícies de fractura dos provetes de tracção com 50% de enchimento



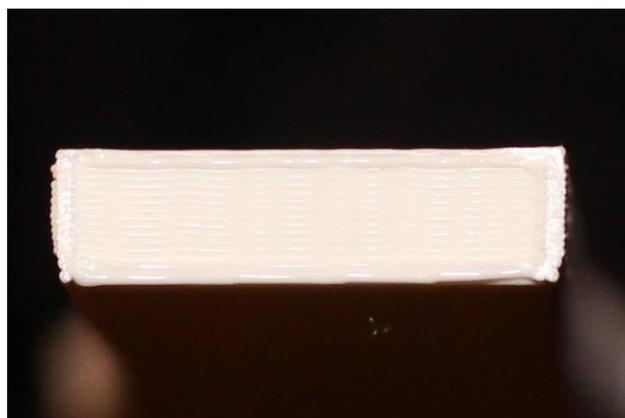
0°



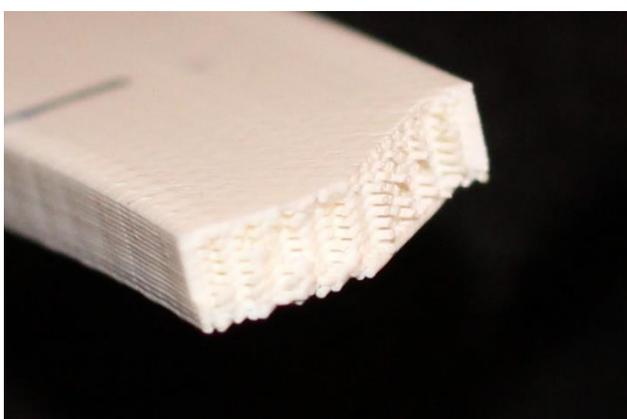
0°



90°



90°



±45°



±45°