



Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***ANÁLISE AO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ESTRUTURAS DE SUPORTE PRODUZIDAS POR FDM***

Joana Domingues Martins

Leiria, *Setembro* de 2016



Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***ANÁLISE AO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ESTRUTURAS DE SUPORTE PRODUZIDAS POR FDM***

Joana Domingues Martins

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Mário António Simões Correia Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Henrique de Amorim Almeida Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro* de 2016

Agradecimentos

Aos Professores Doutor Mário Correia e Doutor Henrique Almeida, orientadores, pela cooperação, disponibilidade, apoio e pela partilha de conhecimentos que foi fundamental.

Ao Professor Doutor Joel Vasco, Coordenador do Mestrado em Engenharia – Mecânica, pelo acompanhamento ao longo desta etapa académica e pela disponibilidade sempre demonstrada.

Aos meus colegas de Mestrado, pelas horas de estudos e pelo companheirismo e cooperação.

Aos meus amigos, pela inspiração, confiança e força que me deram.

À minha família, pelo apoio, compreensão, paciência, confiança e porto de abrigo.

Resumo

A produção aditiva tem vindo a ganhar cada vez mais importância no contexto atual pois, através destes processos, é possível criar protótipos de forma rápida que permitem de forma eficaz a visualização do modelo mas também, nalguns casos, a verificação da funcionalidade do mesmo. Este tipo de fabrico está em ascensão e estão constantemente a serem exploradas novas aplicações. Na produção aditiva, o material de suporte gerado para suportar a construção tem elevada importância no tempo e custo do processo. Neste contexto, torna-se cada vez mais evidente que é necessário entender o comportamento mecânico desta estrutura de modo a tornar o processo mais rápido e com menores custos sem comprometer a resistência das peças produzidas por este. O processo de FDM é um dos processos de produção aditiva que constrói modelos camada a camada a partir de ficheiros CAD que são tratados no *software* da máquina por forma a dividir o modelo em várias camadas finas que geram várias secções com as geometrias correspondentes. A construção do modelo físico é feita através da extrusão e deposição de polímeros consoante a secção pretendida. O principal objetivo deste trabalho é a caracterização mecânica do material de suporte gerado aquando a construção da peça final pretendida. Foi com este objetivo que foram criados modelos de teste através do processo de FDM para serem submetidos a ensaios de compressão de modo a entender de que forma o material de suporte influencia na resistência final do modelo. Da análise dos dados obtidos é possível concluir que o material de suporte não aumenta a resistência das peças produzidas.

Palavras-chave: Material de suporte, FDM, Produção aditiva, caracterização mecânica, resistência mecânica.

Abstract

Additive manufacturing has been increasing its importance in the current context because, through these processes it's possible to create quickly prototypes that allow the view of the model and, in some cases, the verification of its functionality. This type of manufacturing is increasing and there are constantly being explored new applications. In additive manufacturing, the creation of the support material to help the building of the model has an high importance on the time and cost of the process. Therefore, it is necessary to understand the mechanical behaviour of this structure in order to achieve a faster process at a lower price without compromising the mechanical resistance of the parts produced by this processes. The FDM process it's one of the additive manufacturing processes that builds models in a layer by layer fashion from CAD data files that are manipulated by the machine software in order to divide the model in multiple sections with the corresponding geometry. The construction of the physical model is made by the extrusion and deposition of a polymeric material according to the corresponding section previously defined. The main objective of this thesis is the mechanical characterization of the support material generated during the construction of the part. Aiming to achieve this goal, test models using FDM process were produced and subjected to compression tests in order to understand how the support material influences the mechanical behaviour of the model. From this analysis, it was possible to conclude that the support material doesn't increase the resistance of the produced parts.

Keywords: support material, additive manufacturing, FDM, mechanical characterization, mechanical resistance

Lista de figuras

Figura 1 Processo RP genérico (Kamrani & Nasr, 2006).	3
Figura 2 Esquema do processo SLA (CustomPartNet, 2009).	6
Figura 3 Esquema do processo de fabrico FDM (CustomPartNet, 2009).	7
Figura 4 Processo de construção LOM (CustomPartNet, 2009).	8
Figura 5 Processo esquemático de SLS (CustomPartNet, 2009).	10
Figura 6 Esquema do processo 3D Printing (CustomPartNet, 2009).	11
Figura 7 CubePro Duo (3D Systems, 2016).	17
Figura 8 Máquina para ensaios de compressão.	18
Figura 9 Balança Mettler Toledo AG204.	19
Figura 10 Dimensões dos provetes para ensaio.	19
Figura 11 Configuração provetes para fabrico.	20
Figura 12 Configuração provetes para testes.	20
Figura 13 Definição dos parâmetros iniciais da impressora	21
Figura 14 Seleção dos parâmetros de impressão no software	22
Figura 15 Exemplo de uma curva força-deslocamento obtida.....	23
Figura 16 Resultados no software do provete 50% de nylon com suporte.	25
Figura 17 Resultado obtido após fabricação e pós-processamento dos provetes 50% nylon com suporte.	26
Figura 18 Provetes sem suporte obtidos.	26
Figura 19 Exemplo provetes com suporte obtidos.	26
Figura 20 Provetes obtidos de todos os tipos de configurações.	27
Figura 21 Comparação das massas dos provetes com e sem suporte.	27
Figura 22 Deformações observadas durante os ensaios de compressão.	28
Figura 23 Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon sem suporte.	28
Figura 24 Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon com suporte.	29
Figura 25 Comparação Curvas médias Força-Deslocamento 25% Nylon com/sem suporte.	30
Figura 26 Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 50% Nylon com e sem suporte.	30

Figura 27 Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 75% Nylon com e sem suporte.	31
Figura 28 Curvas Força-Deslocamento 100% Nylon.	32
Figura 29 Curvas Força-Deslocamento 0% Nylon / 100% Infinity.	32
Figura 30 Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações sem suporte.	33
Figura 31 Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações com suporte.	34
Figura 32 Resultado das forças máximas obtidas.	35
Figura 33 Combinação dos dados das forças máximas com as massas dos provetes	36

Lista de tabelas

Tabela 1 Classificação dos processos de fabrico aditivo.	4
Tabela 2 Características e aplicações do Infinity (adaptado de 3D Systems,2016)...	15
Tabela 3 Características e aplicações do Nylon (adaptado de 3D Systems,2016).....	16
Tabela 4 Parâmetros de fabricação do Software	22

Lista de siglas

CAD – *Computer Aided Design*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

SLS – *Selective Laser Sintering*

MJM – *Multi-Jet Modeling System*

SLA – *Stereolithography*

SLM – *Selective Laser Melting*

EBM – *Electron Beam Melting*

3DP – *Three dimensional printing*

3D – *Three dimensional*

RP – *Rapid Prototyping*

RT – *Rapid Tooling*

UV – *Ultraviolet*

DOE – *Design of experiments*

LAM – *Laser Additive Manufacturing*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CNC – *Computer Numerical Control*

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XIII
ÍNDICE	XV
1. INTRODUÇÃO	1
2. PROCESSOS DE FABRICO ADITIVO	3
2.1. Processos em base líquida	4
2.2. Processos em base sólida	6
2.3. Processos baseados em pó	9
2.4. Implementação do fabrico do modelo	12
2.5. Caracterização mecânica	13
2.6. Objetivo e Motivação deste Trabalho	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Materiais	15
3.2. Métodos	17
3.2.1. Equipamento	17
3.2.2. Geometria dos provetes	19
3.2.3. Criação virtual de modelos	21
3.2.4. Ensaio de compressão	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Produção dos provetes	25
4.2. Ensaio de compressão	28
5. CONCLUSÕES	37
TRABALHOS FUTUROS	39
BIBLIOGRAFIA	41

1. Introdução

As atuais exigências de mercado são as de melhor qualidade, melhor eficiência e redução de custos, bem como a capacidade para satisfazer os objetivos ambientais e de reciclagem, com a conseqüente rapidez no desenvolvimento do produto e redução do tempo que este demora a chegar ao mercado. Em particular, produtos de baixo volume ou que mudam rapidamente de volume exigem a criação de ferramentas para protótipos e de produção de componentes que são das fases que mais tempo e custos consomem. Para reduzir o tempo de desenvolvimento do produto e o custo de fabricação surgiu a tecnologia de Prototipagem Rápida (RP), que oferece o potencial de mudar drasticamente os processos de fabrico (L.M. Galantucci, 2008).

Modelos e protótipos podem ser fabricadas com a tecnologia RP não só para fins de visualização, mas também para construir partes funcionais. O *Rapid Tooling (RT)* é uma extensão natural da RP e surgiu a partir da necessidade de se avaliar os modelos RP em termos do seu desempenho. Para permitir a validação do desempenho, os protótipos funcionais devem ser produzidos usando o mesmo material do que será utilizado na produção em grande escala. Além disso, estes processos não são exclusivamente utilizados para prototipagem e novas oportunidades e aplicações para estes processos de fabrico estão a surgir. Assim, o processo de RT complementa as opções de RP, porque estes são capazes de fornecer quantidades maiores de modelos numa ampla variedade de materiais (L.M. Galantucci, 2008).

Na maioria dos casos os processos de prototipagem rápida precisam de gerar suportes para as estruturas a fabricar, isto acontece porque ao serem construídos de forma aditiva, algumas geometrias não conseguem estar sustentadas apenas pelo modelo final que se pretende ao longo da construção (CHUA, et al., 2003).

As estruturas de suporte são tipicamente ocas ou estruturas celulares que são removidas assim que o objeto é construído, assim estas representam um desperdício no processo de fabricação aditiva. A fabricação destes suportes que serão posteriormente retirados requerem gasto de tempo, energia e material, assim o tempo de fabricação do componente aumenta. A quantidade de material gasto para construir as estruturas de suporte afeta os custos de produção, especialmente quando são utilizadas ligas metálicas

como as de titânio, por exemplo, na produção de componentes aeroespaciais. A presença de estruturas de suporte aumenta, tanto o tempo necessário para a fabricação da peça como, o tempo e a complexidade das operações de pós-produção. De facto, a remoção de suporte e o acabamento superficial são geralmente realizados através de polimento manual que é um processo demorado, muito especializado e caro. Minimizar a quantidade de superfícies suportadas pode tornar esta operação mais curta, pois melhora a eficiência do pós-processamento. Consequentemente, a eficiência do material das estruturas de suporte em termos de *design* e otimização são altamente importantes para melhorar a sustentabilidade e eficiência da produção aditiva metálica (Strano, et al., 2012).

Tendo em conta o papel do material de suporte, é necessário estudar também qual a sua importância no comportamento mecânico da peça fabricada. É importante avaliar os parâmetros de construção para que o processo seja mais rápido e mais barato mas se não estamos a comprometer a resistência mecânica pretendida para o protótipo. É este o enfoque deste trabalho que visa avaliar o contributo mecânico das estruturas de suportes em componentes produzidas por processo aditivo.

Neste estudo foi utilizado um equipamento de FDM para produzir provetes que foram avaliados à compressão. Os provetes extrudidos, obtidos no equipamento FDM foram dos seguintes materiais; *nylon*, *nylon* com suporte de *infinity* e provetes apenas de *infinity*. Foram elaboradas diversas geometrias para se conseguir comparar e relacionar o contributo das estruturas de suporte no comportamento mecânico.

2. Processos de fabrico aditivo

A prototipagem rápida (RP) é uma tecnologia para a conversão direta de um ficheiro CAD tridimensional num protótipo físico. A RP permite a construção automática de modelos físicos e é usada para reduzir significativamente o tempo de ciclo do desenvolvimento do produto e para melhorar a qualidade final do produto desenvolvido. Antes de ser aplicada a prototipagem rápida, os equipamentos de controlo numérico computacional (CNC) eram usados para criar protótipos de maneira direta ou indireta usando ficheiros CAD. O processo CNC consiste na remoção de material com o objetivo de obter a forma final da peça, ao contrário da tecnologia RP uma vez que os modelos são obtidos pela adição de material camada a camada até toda a peça estar construída. No processo RP são usadas camadas finas de corte transversal para transformar os materiais em protótipos físicos (Kamrani & Nasr, 2006).

Os passos gerais para um processo RP estão ilustrados na Figura 1.

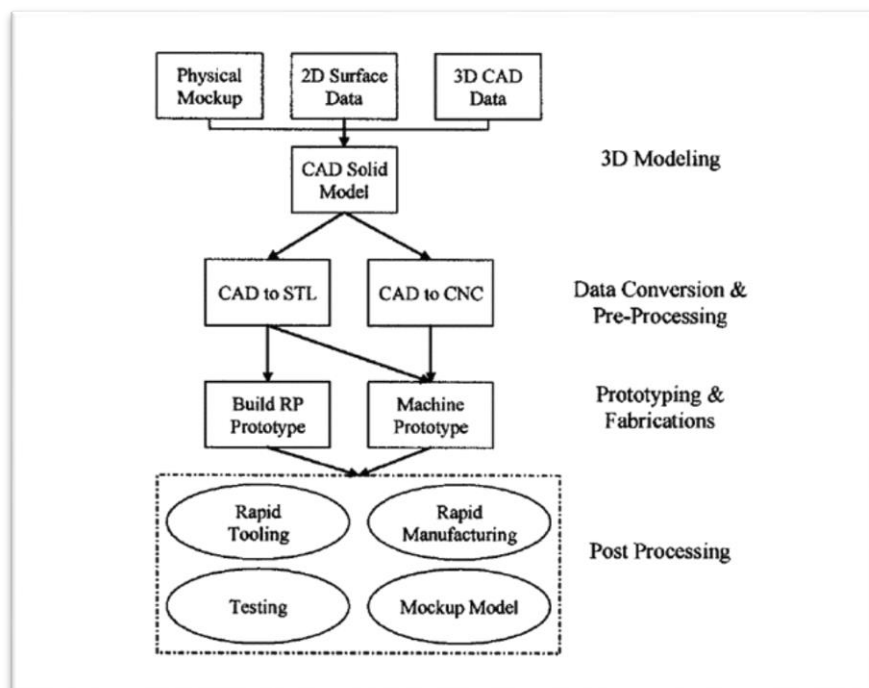


Figura 1 Processo RP genérico (Kamrani & Nasr, 2006).

Existem muitas maneiras com as quais se podem classificar os vários sistemas RP no mercado, uma das melhores maneiras é classificar os sistemas RP pela forma inicial do material utilizado, isto é, o material de que o protótipo ou a peça é construída. Desta forma, todos os sistemas RP podem ser facilmente classificados como processos em base líquida, base sólida ou baseados em pó (CHUA, et al., 2003). A Tabela 1 permite analisar a divisão de classificação anteriormente descrita.

Tabela 1 Classificação dos processos de fabrico aditivo.

	Processos de fabrico aditivo		
Classificação	Base líquida	Base Sólida	Baseados em pó
Principais processos	Stereolithography (SLA)	Fused Deposition modeling (FDM)	Selective Laser Sintering (SLS)
	Multi-Jet Modeling System (MJM)	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Three dimensional printing (3DP)
			Selective Laser Melting (SLM)
			Electron Beam Melting (EBM)

Nos pontos seguintes são apresentados detalhadamente os principais processos que existem em cada uma das classificações anteriormente nomeadas.

2.1. Processos em base líquida

A maioria dos sistemas de prototipagem rápida à base de líquidos produz as peças numa cuba de resina líquida foto-curável, uma resina orgânica que cura ou solidifica através do efeito da exposição à radiação de laser, normalmente na gama UV. O laser cura

a resina junto à superfície, formando uma camada endurecida. Quando uma camada da peça é formada, esta irá descer através de um sistema de controlo de elevação de modo a permitir que a próxima camada possa ser formada de semelhante forma. Este processo continua até a peça estar concluída. A cuba pode então ser esvaziada e a peça removida para um pós-processamento caso seja necessário.

Existem variações a esta técnica pelos vários fornecedores e são dependentes do tipo de luz ou laser, o método de varrimento ou de exposição, tipo de resina líquida, tipo de elevação e do sistema óptico utilizado (CHUA, et al., 2003).

a) *Stereolithography (SLA)*

O processo de estereolitografia (SLA) cria objetos de plástico tridimensionais diretamente dos dados do CAD. O processo começa com o recipiente preenchido com a resina líquida foto-curável e a mesa elevatória colocada logo abaixo da superfície da resina líquida (CHUA, et al., 2003)

O operador abre um ficheiro de um modelo sólido de CAD no sistema. O sistema projeta suportes para estabilizar a peça durante a construção. O *software* converte os dados do ficheiro CAD num arquivo STL depois divide o modelo em várias secções transversais com espessura entre 0,025-0,5 mm (CHUA, et al., 2003).

O controlador ótico do sistema direciona e foca o feixe de laser de maneira a solidificar uma secção transversal bidimensional correspondente à camada na superfície da resina líquida foto-curável até uma profundidade maior do que uma espessura da camada (CHUA, et al., 2003).

A mesa elevatória, em seguida, desce a altura de uma camada de modo a cobrir o polímero sólido com uma outra camada de resina líquida. Um sistema de varrimento ou lâmina de vácuo desloca-se ao longo da superfície a recobrir a próxima camada de resina na superfície. O laser, em seguida, desenha a camada seguinte. Este processo continua construindo a peça de baixo para cima, até que o processo conclua a peça. A peça é então levantada para fora da cuba e são retirados os excessos de polímero (CHUA, et al., 2003).

A representação deste processo encontra-se na Figura 2.

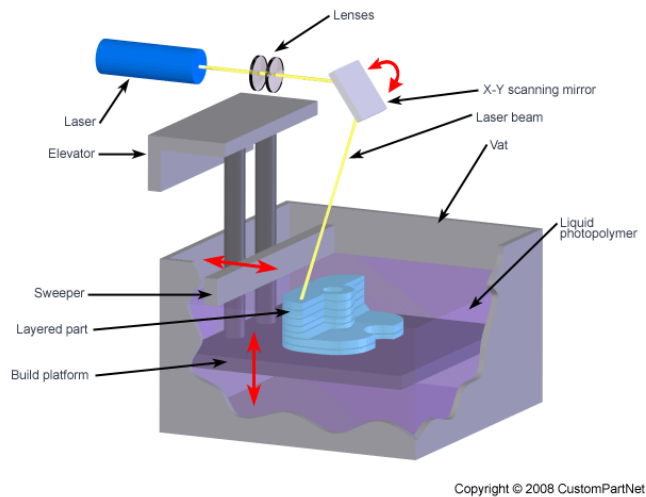


Figura 2 Esquema do processo SLA (CustomPartNet, 2009).

2.2. Processos em base sólida

Os sistemas RP à base de sólidos abrangem todas as formas de material no estado sólido. No contexto, a forma sólida pode incluir a forma sob a forma de um fio, um rolo, laminados e paletes. Todos estes processos utilizam um material sólido (de qualquer forma) para criar protótipo. Um grupo de sistemas de RP em base sólida utiliza pó como meio de prototipagem (CHUA, et al., 2003), os processos principais desta categoria são descritos nos subcapítulos seguintes.

a) *Fused deposition modeling (FDM)*

Neste processo, o modelo geométrico de uma peça é criado num *software* CAD que usa ficheiros com formato IGES ou STL. O ficheiro pode, em seguida, ser importado para a estação de trabalho onde vai ser processado através do *software* proprietário. Dentro deste programa o ficheiro CAD é dividido em camadas horizontais depois do modelo ser orientado para a posição de construção otimizada, qualquer estrutura de suporte que seja necessária é detetada e gerada automaticamente. A espessura da camada pode ser definida manualmente para valores entre os 0.172 até 0.356 mm dependendo das necessidades do modelo. As trajetórias das ferramentas para o processo de construção são geradas e são transferidas para a máquina de FDM. O material para a construção da peça é fornecido em filamentos numa bobina que alimenta a cabeça de extrusão onde é aquecido para um estado

semi-líquido. O material semi-líquido é extrudido através da cabeça e, em seguida depositado em camadas ultra finas da cabeça FDM, uma camada de cada vez. Uma vez que o ar existente na câmara de construção encontra-se a uma temperatura abaixo do ponto de fusão do material, o material após deposição inicia a solidificação rapidamente. Movendo-se no plano X-Y, a cabeça segue a trajetória gerada pelo *software* construindo a camada definida. Quando a camada está completa, a plataforma de construção movimenta-se para poder construir a próxima camada. A largura do material extrudido pode variar de entre 0.250 a 0.965 mm dependendo do modelo. Neste processo um mecanismo de ponta dupla na máquina FDM dispensa dois materiais de construção. O primeiro material é usado para produzir a geometria do modelo e o segundo material é usado para produzir as estruturas de suporte, este material secundário forma uma ligação com o material primário e pode ser retirado através de lavagem posterior assim que o modelo estiver completo (CHUA, et al., 2003).

Este processo está esquematizado na Figura 3 onde permite visualizar de que forma o material extrudido constrói a peça.

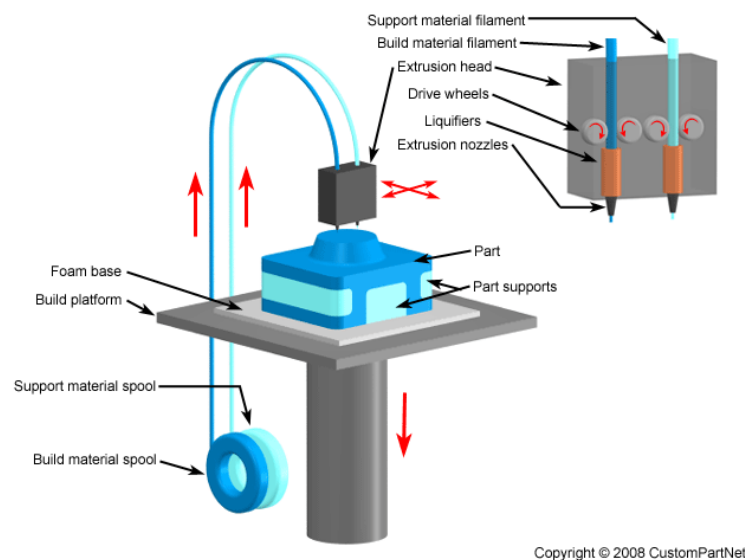


Figura 3 Esquema do processo de fabrico FDM (CustomPartNet, 2009).

b) *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

O processo *Laminated Object Manufacturing*[®] (LOM[™]) é um método de fabrico automatizado em que uma peça 3D é construída a partir de uma representação em CAD do seu sólido através do corte de secções transversais do modelo. O processo consiste em três fases: pré-processamento, construção e pós-processamento (CHUA, et al., 2003).

O processo de LOM baseia-se nos seguintes princípios:

(1) As peças são construídas, camada a camada, através do corte de cada camada de papel que é feito usando o contorno da peça e um laser CO₂.

(2) Cada camada do processo de construção contém as secções transversais de uma ou várias peças. A camada seguinte é então laminada e construída diretamente no topo da camada de corte a laser.

(3) O eixo ZZ é ativado por uma plataforma de elevação que desce assim que uma camada esteja completa, a próxima camada é então laminada e pronta para o corte.

(4) Não existem estruturas de suporte adicionais (CHUA, et al., 2003).

Na Figura 4 é possível ver como funciona o processo esquematicamente.

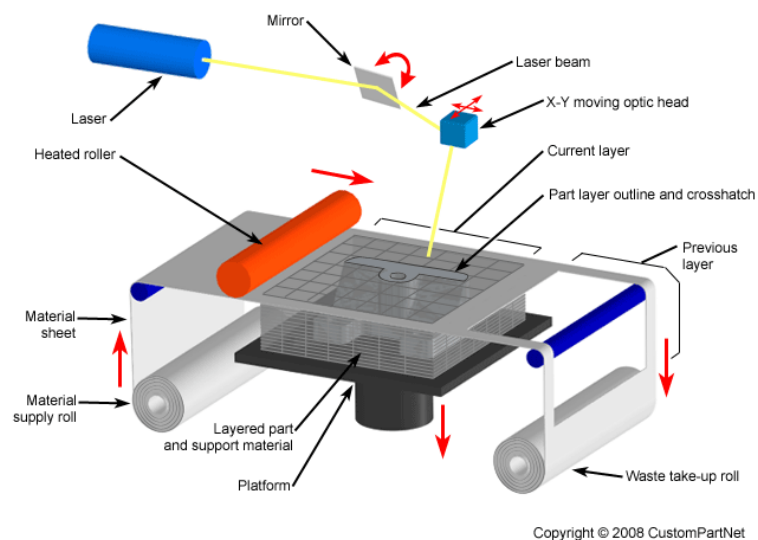


Figura 4 Processo de construção LOM (CustomPartNet, 2009).

c) *Multi-Jet Modeling System* (MJM)

O processo de *Multi-Jet Modeling System* constrói modelos usando uma técnica semelhante a um jato de tinta ou a uma impressão de mudança de fase aplicada a três dimensões. Uma cabeça de impressão de jatos orientados numa matriz linear constrói modelos através de camadas sucessivas, cada jato aplica um termoplástico especial apenas onde é definido. A cabeça MJM anda para trás e para a frente como uma impressora linear (eixo-X), construindo uma camada daquilo que será um objeto tridimensional. Se a peça for mais larga do que a cabeça da impressora, a plataforma reposiciona-se (eixo-Y) para continuar a construir a camada. Quando a camada está completa, a plataforma distancia-se da cabeça (eixo-Z) e esta começa a construir a nova camada. Este processo é repetido até o modelo estar completo (CHUA, et al., 2003).

A impressora mais conhecida que utiliza este processo é a ThermoJet® que foi criada pela 3D Systems em 1999.

2.3. Processos baseados em pó

Em bom rigor, o pó é, em geral, o estado sólido (CHUA, et al., 2003) de matéria dividida em muitas partículas. No entanto, é intencionalmente criada como uma categoria fora dos sistemas RP em base sólida para que o pó possa ser significativo como forma de grão (CHUA, et al., 2003).

a) *Selective Laser Sintering* (SLS)

O processo SLS® baseia-se nos dois seguintes princípios:

(1) As peças são construídas por sinterização de pó através de um feixe de laser de CO₂. A interação do feixe de laser com o pó, faz com que a temperatura suba até ao ponto de fusão do pó, o que resulta na fusão das partículas, fundindo as partículas de pó a si próprias e fundindo as partículas entre si e à camada anterior, forma-se um sólido.

(2) A construção da peça é feita camada a camada. Cada camada do processo de construção contém a secção transversal de uma ou mais peças. A próxima camada é então construída diretamente em cima da camada sinterizada anteriormente, em seguida é depositada uma camada de pó por meio de um mecanismo de rolos. A densidade de empacotamento das partículas de pó durante a sinterização influencia a densidade final da peça. Geralmente quanto maior for a densidade de empacotamento, melhores propriedades mecânicas terá a peça produzida (CHUA, et al., 2003).

Na Figura 5 é possível ver esquematicamente o processo descrito acima.

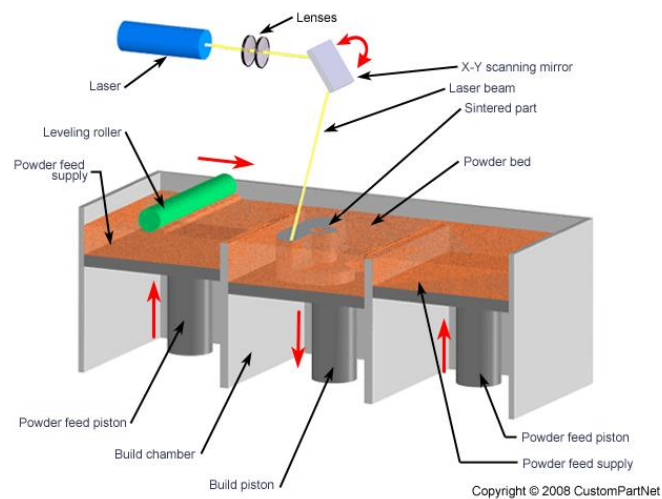


Figura 5 Processo esquemático de SLS (CustomPartNet, 2009).

b) *Three-Dimensional Printing (3DP)*

Esta tecnologia foi criada e é usada pelas impressoras 3D da empresa *Z Corporation* desde 1997. Baseia-se no seguinte processo:

- (1) A máquina espalha uma camada de pó a partir da caixa de alimentação para cobrir a superfície da plataforma de construção. A impressora imprime então a solução ligante sobre o pó solto, formando a primeira secção transversal (CHUA, et al., 2003).

- (2) O pó é ligado através do ligante que é depositado. O restante pó permanece solto e suporta as camadas que serão impressas acima (CHUA, et al., 2003).
- (3) Quando a secção transversal é completa, a plataforma de construção é baixado, uma nova camada de pó é espalhado pela superfície, e o processo é repetido. A peça cresce camada a camada na plataforma de construção até estar concluída, completamente rodeada e coberta por pó solto. Finalmente a plataforma de construção é elevado e o pó solto é aspirado, revelando a peça completa (CHUA, et al., 2003).
- (4) Assim que a construção está concluída, o excesso de pó é aspirado e as peças são retiradas da plataforma. Uma vez removidas, as peças podem ser acabadas de diversas formas consoante a necessidade. Para visualizar rapidamente o *design* as peças podem ser deixadas no seu aspeto em bruto ou “verde”. Para produzir rapidamente um modelo mais robusto podem ser mergulhadas em cera. Para obtermos um modelo robusto este pode ser polido, acabado e pintado, a peça pode ser infiltrada com uma resina (CHUA, et al., 2003).

Na Figura 6 está representado o processo de produção de forma esquemática.

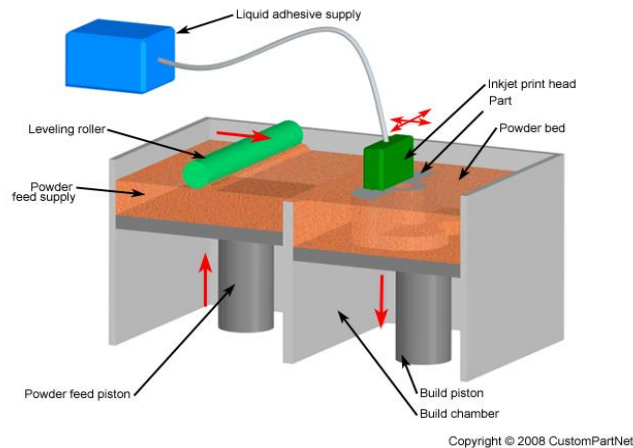


Figura 6 Esquema do processo 3D Printing (CustomPartNet, 2009).

2.4. Implementação do fabrico do modelo

Geralmente, muitos dos parâmetros dos processos de produção aditiva contribuem para a qualidade da peça a produzir, tais como a espessura de camada, as estruturas de suporte, os caminhos da ferramenta e estratégias de deposição. As melhorias a partir destas perspectivas podem, de certo modo, aumentar a precisão de fabricação para fins industriais (Ahn, et al., 2012).

O planeamento do processo de produção aditiva tem um papel muito significativo na eficiência e precisão de fabricação. Normalmente, o planeamento do processo é basicamente o mesmo entre todas as tecnologias de prototipagem rápida e as quatro maiores tarefas são: determinação da orientação de produção, criação do suporte, corte por camadas e a criação dos caminhos da ferramenta (Kulkarni, et al., 2000) (Marsan & Dutta, 1997).

A orientação do modelo conduz diretamente para a criação da estrutura de suporte e para as propriedades mecânicas da peça (Alexander, et al., 1998); a estratégia para a divisão das camadas afeta a rugosidade da superfície e a eficiência dependendo da espessura da camada; o caminho da ferramenta determina padrões de preenchimento que estão correlacionado com a suavidade da camada e a resistência, e isto está também relacionado com a eficiência do planeamento do fio de deposição do material (Yu-an, et al., 2015).

Após a orientação do modelo estar definida, as partes em balanço da peça são identificadas e são suportadas por estruturas adicionais que serão removidas após a conclusão do processo. Aquando a criação do suporte, existem alguns fatores técnicos que têm de ser tidos em conta, tais como o consumo de material, o tempo de produção, o acabamento de superfície após o processo de remoção. A criação de uma estrutura de suporte eficaz pode determinar se o objeto será ou não construído com sucesso (Yu-an, et al., 2015).

2.5. Caracterização mecânica

A redução dos tempos de fabricação e, mais em geral, a otimização dos processos aditivos de prototipagem rápida são ainda um assunto que é base de muitas pesquisas. A sua otimização é muito importante a nível de redução de custos e o tempo que os produtos demoram a chegar ao mercado mas também para os custos ambientais enquanto reduz o gasto de energia elétrica e o consumo de material. Nos últimos anos os esforços de investigação neste sentido têm-se concentrado principalmente em três aspetos, nomeadamente (i) a otimização da direção de construção, (ii) a otimização da configuração dos parâmetros e (iii) a implementação de algoritmos para o CAD para melhorar a eficiência da fabricação por camadas (L.M. Galantucci, 2008).

Galantucci et al. (L.M. Galantucci, 2008) estudaram o comportamento mecânico à compressão de estruturas produzidas pela tecnologia FDM tendo em conta três variáveis: inclinação da parede de construção, largura do fio de deposição e largura da parede da amostra. Cada um destes fatores foi testado a dois níveis e efetuado um desenho de experiências (DOE) para analisar a influência das fatores. O objetivo reduzir o tempo de produção e diminuir o material consumido, reduzindo assim os custos de produção. Este estudo concluiu que “a largura do fio só é relevante em termos do tempo de produção e não tem influência na força de compressão máxima. No entanto a inclinação da parede de construção e a largura da parede dos provetes têm uma importância muito grande nestes aspetos” (L.M. Galantucci, 2008).

Também dentro do estudo dos parâmetros que influenciam as peças produzidas por produção aditiva Nidagundi, et al (Nidagundi, et al., 2015) encontraram a otimização do processo tendo em conta a maneira como os parâmetros angulo de preenchimento, angulo de orientação da peça e espessura de camada influenciam as características de tempo de produção, resistência à tração, precisão dimensional e rugosidade da superfície.

Relativamente ao estudo do material de suporte utilizado na produção aditiva, alguns autores debruçaram-se sobre vários aspetos deste tema. Um dos aspetos prende-se com a forma como o material de suporte é caracterizado tal como fizeram Jarvinen et al (Jarvinen, et al., 2014) onde foram caracterizados dois tipos de geração do suporte para o processo *Laser Additive Manufacturing* (LAM). A caracterização foi feita pela facilidade em retirar o material de suporte da peça final.

2.6. Objetivo e Motivação deste Trabalho

Este trabalho visa o estudo do contributo das estruturas de suporte na resistência mecânica de componentes produzidos por FDM.

Em algumas situações de fabricação de componentes recorrendo a esta tecnologia não é possível eliminar nem retirar as estruturas de suporte que são geradas para auxiliar na fabricação do modelo. Assim estas estruturas ficam integradas no próprio componente.

Neste estudo vai ser avaliada a resistência mecânica à compressão de componentes produzidos por FDM com diferentes geometrias e distintas combinações de materiais. Deste modo será possível relacionar o efeito das estruturas de suporte na resistência mecânica nos componentes gerados por FDM.

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

Para a produção dos provetes foram usados o *Nylon for CubePro* e o *Infinity™ Rinse-away support material* como materiais de construção, sendo que o segundo corresponde a material de suporte.

Os *nylons* são membros da família das poliamidas (PA) e têm na sua maioria estrutura cristalina. O *nylon* é o principal material de prototipagem usado pelas tecnologias de sinterização por laser e também por FDM (Kamrani & Nasr, 2006).

Para o material de suporte, foi usado o material chamado *Infinity* que tem como principal característica o facto de ser removível de forma fácil após a produção do modelo pretendido.

A empresa *3D Systems* apresenta algumas características e aplicações destes materiais que estão descritos na e Tabela 2 na Tabela 3.

Tabela 2 Características e aplicações do Infinity (adaptado de 3D Systems,2016)

Características/Aplicações <i>Infinity</i>
Características: <ul style="list-style-type: none">• Material de suporte;• Dissolve-se em água;• Pode ser usado nos lavatórios de casa• Seguro para esgotos domésticos;• Permite complexidade;• Permite movimento.
Aplicações: <ul style="list-style-type: none">• Diferentes geometrias que antes não eram possíveis nas impressoras;• Estatuetas maleáveis;• Saliências/impressões dentro de impressões.

Tabela 3 Características e aplicações do Nylon (adaptado de 3D Systems,2016).

Características/Aplicações Nylon

Características:

- Termoplástico;
- Excepcionalmente durável;
- Elevada rigidez, dureza e resistência;
- Elevada resistência ao calor
- Elevada resistência face ao peso;
- Excelente resistência à abrasão;
- Excelente resistência ao desgaste e à corrosão;
- Elevada resistência química e a óleos combustíveis;
- Resistência a insetos, fungos, bolores e mofo;
- Adesão superior entre camadas de impressão.

Aplicações:

- Protótipos e modelos funcionais e duráveis;
- Aeroespacial, automóvel e peças para desportos motorizados;
- Engrenagens, acessórios e rolamentos;
- Caixas e invólucros;
- Impulsionadores e conectores;
- Bens de consumo desportivo;
- Reservas de fluidos e tanques de gás;
- Suportes e coletores de admissão;
- Peças que exigem operações secundárias como pintura, fresagem ou ligação adesiva.

3.2. Métodos

Para que a caracterização mecânica das estruturas de suporte fosse possível foi necessário definir a metodologia a adotar para melhores resultados. Assim, começou-se por definir os provetes de acordo com o teste a ser feito consultando a norma dos testes de compressão em plásticos. Após esta definição foram apurados o número de provetes necessários e quais as suas estruturas. Deste modo, chegou-se à conclusão que seria necessário produzir provetes com e sem estrutura de modo a facilitar a comparação nos resultados.

De maneira a se conseguir obter uma caracterização mecânica dos componentes produzidos, decidiu-se que iriam ser feitos testes de compressão aos provetes. Para a realização de testes mecânicos de compressão em materiais plásticos foi necessário consultar e seguir as indicações da norma ASTM D695.

3.2.1. Equipamento

Neste trabalho foi utilizada a máquina de prototipagem rápida *CubePro Duo* (Figura 7) da empresa *3D Systems*. Este equipamento está disponível no laboratório de Prototipagem Rápida e Engenharia Inversa do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

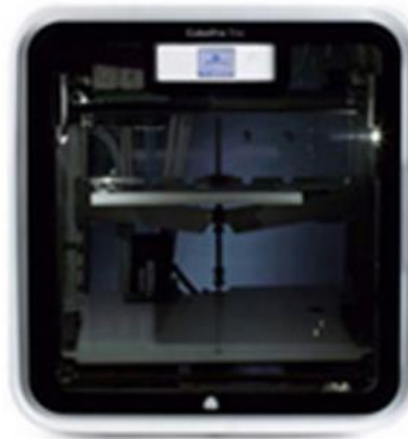


Figura 7 *CubePro Duo* (3D Systems, 2016).

O sistema CAD Inventor 2016 foi utilizado para criar os arquivos STL que foram interpretados e manipulados pelo *software* CubePro 2016 desenvolvido pela marca da máquina (3D Systems).

Os ensaios mecânicos de compressão foram realizados na máquina de ensaios universais ZWICK Z100 (Figura 8) do Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria.



Figura 8 Máquina para ensaios de compressão.

Foi utilizada ainda uma balança analítica para obter os valores da massa de cada um dos provetes produzidos. A Figura 9 mostra a balança durante a pesagem de um provete com 100% *infinity*.



Figura 9 Balança Mettler Toledo AG204.

3.2.2. Geometria dos provetes

De acordo com a norma ASTM D695, os provetes terão as dimensões representadas na Figura 10.

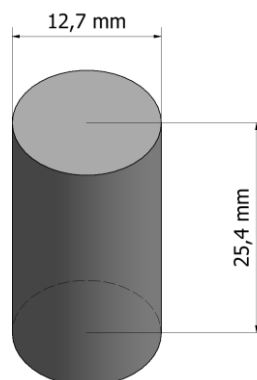


Figura 10 Dimensões dos provetes para ensaio.

Para que fosse possível o *software* admitir o material de suporte, considerámos que os provetes teriam que ser ocos por dentro e também que tivessem uma estrutura suspensa no cimo da mesma para que o *software* gerasse o material de suporte necessário tal como se pode verificar na Figura 11. Ainda nesta figura é possível observar a direção de

construção que foi definida. Após o fabrico foi necessário retirar a estrutura suspensa de modo a obter o provete na forma final pretendida como ilustra a Figura 12.

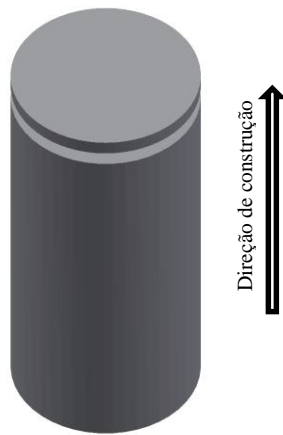


Figura 11 Configuração provetes para fabrico.



Figura 12 Configuração provetes para testes.

De modo a podermos avaliar a influência da espessura da parede através do volume sólido relativamente ao volume de material de suporte, foram considerados cinco tipos de geometrias que diferem na quantidade de material de *nylon*. Dentro destas geometrias é ainda necessário acrescentar a variável com e sem material de suporte de modo a obtermos dados nos testes para caracterizar mecanicamente esse material, assim temos:

- Volume sólido 100%;
- Volume sólido 75% (com/sem suporte);
- Volume sólido 50% (com/sem suporte);
- Volume sólido 25% (com/sem suporte);
- Só estrutura de suporte.

Os valores do volume e raio interno foram calculados de modo a respeitar estas percentagens.

3.2.3. Criação virtual de modelos

O número de provetes a produzir tendo em conta as indicações da norma são cinco provetes de cada tipo, ou seja $5 \times 8 \text{ tipos} = 40$ provetes.

Inicialmente é necessário dar a informação à impressora qual será o material em que iriam ser produzidos os provetes para esta poder definir de forma automática os seus parâmetros de temperatura e grau de escoamento do material. A definição do material é feito num menu do *software* como ilustra a Figura 13.

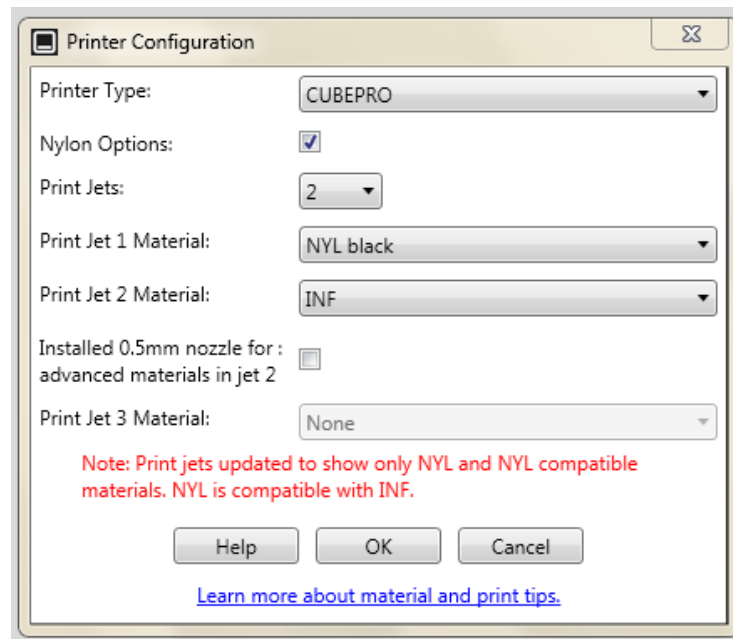


Figura 13 Definição dos parâmetros iniciais da impressora

Estes provetes terão composições diferentes devido às diferenças de volume de material existente, no entanto, no tipo de impressão e na força de impressão foi definido que teriam todos a mesma base de modo a poder caracterizar o material de suporte de forma mais eficaz.

Assim, de entre os parâmetros que o *software* nos permite escolher, como se pode verificar na Tabela 4, foram definidos o tipo de impressão “*Diamonds*” que corresponde a um padrão de impressão forte com três direções de suporte em cruz e a força de impressão “*Solid*” que preenche a camada sem espaços vazios.

Tabela 4 Parâmetros de fabricação do Software

Tipo de impressão	Diamonds		HoneyComb
Força de impressão	Strong	Almost Solid	Solid

A definição destes parâmetros tiveram por base os fatores que o *software* da máquina utilizada nos permite alterar. A Figura 14 permite visualizar o menu onde é possível seleccionar os parâmetros de impressão pretendidos.

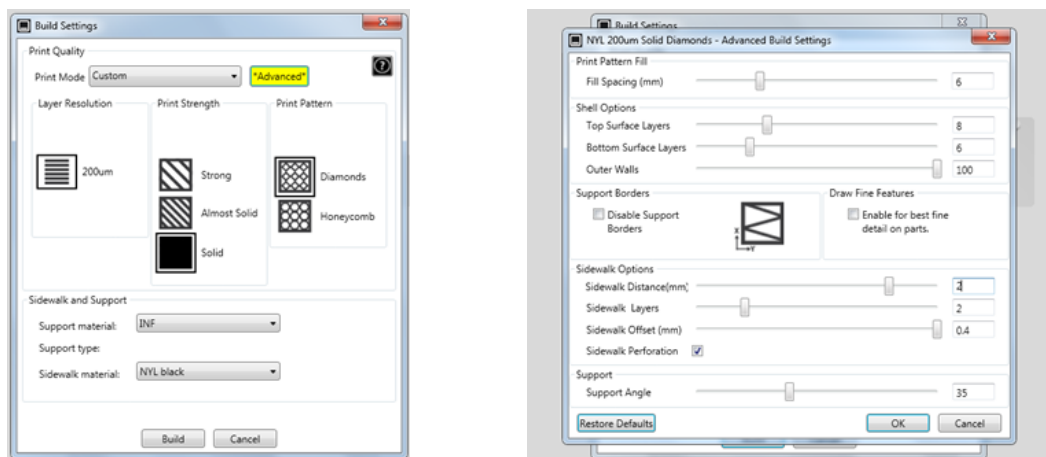


Figura 14 Seleção dos parâmetros de impressão no software

Assim, com recurso ao *software CubePro* é possível simular a estrutura do modelo que vai ser construído bem como o seu tempo de fabrico.

3.2.4. Ensaio de compressão

Estes ensaios foram realizados conforme a norma ASTM D695 a uma velocidade de 1 mm/min e à temperatura ambiente. Cada provete foi testado individualmente até chegar ao seu ponto de rotura, posteriormente foram analisados os valores de força [N] e deslocamento [mm] para cada um dos casos de forma a obter a curva de força [N] - deslocamento [mm] conforme exemplo da Figura 15.

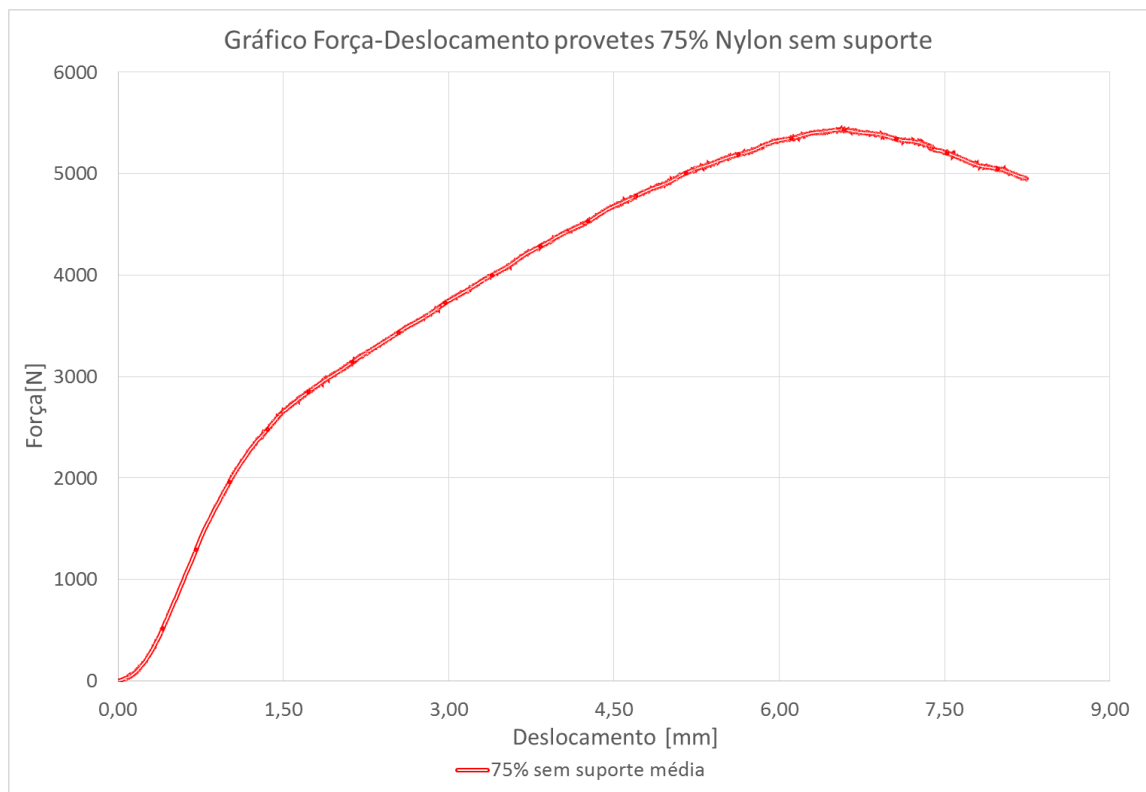


Figura 15 Exemplo de uma curva força-deslocamento obtida

4. Resultados e Discussão

4.1. Produção dos provetes

A Figura 16 mostra a simulação da fabricação dos provetes em duas vistas diferentes e a Figura 17 o resultado verdadeiramente obtido após a produção dos mesmos. Nesta imagem é possível observar os provetes com 50% de volume sólido com suporte. Na Figura 18 são mostrados os provetes sem suporte obtidos após a produção e pós-processamento. A Figura 18 e a Figura 19 mostram os provetes obtidos sem suporte e com suporte respectivamente.

Os provetes foram construídos cinco de cada vez, ou seja, cinco de cada tipo de uma vez.

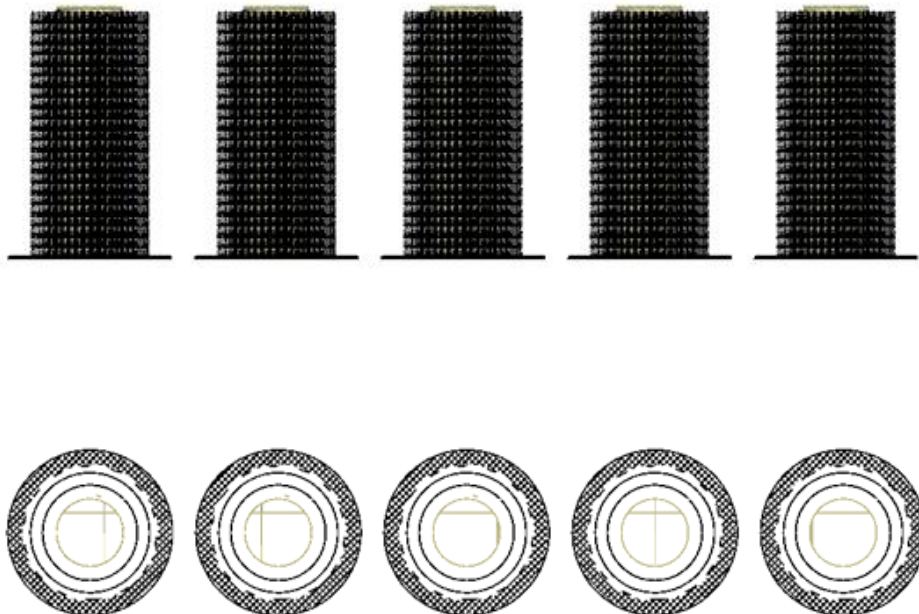


Figura 16 Resultados no software do provete 50% de nylon com suporte.

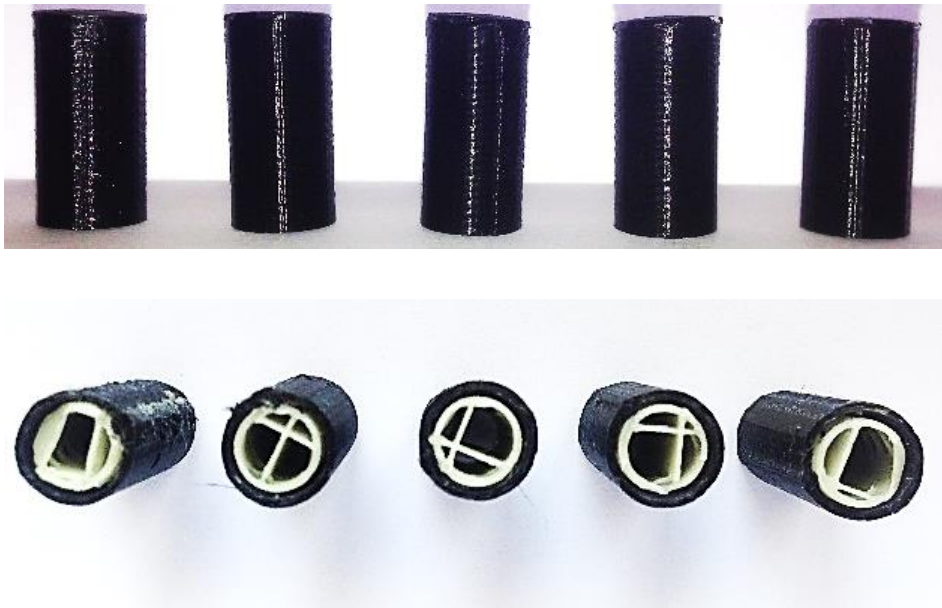


Figura 17 Resultado obtido após fabricação e pós-processamento dos provetes 50% nylon com suporte.



Figura 18 Provetes sem suporte obtidos.

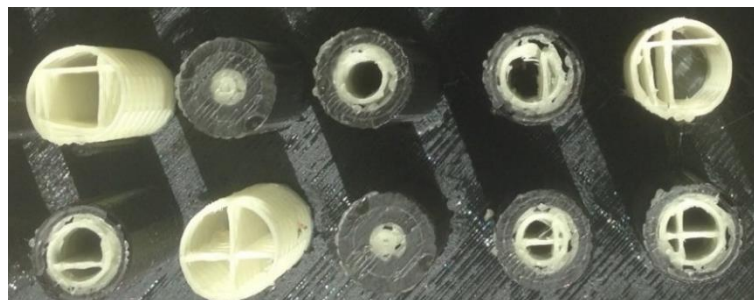


Figura 19 Exemplo provetes com suporte obtidos.

Na Figura 20 é possível observar os provetes obtidos com material de suporte (linha de cima) e os mesmos obtidos sem material de suporte (linha e baixo).

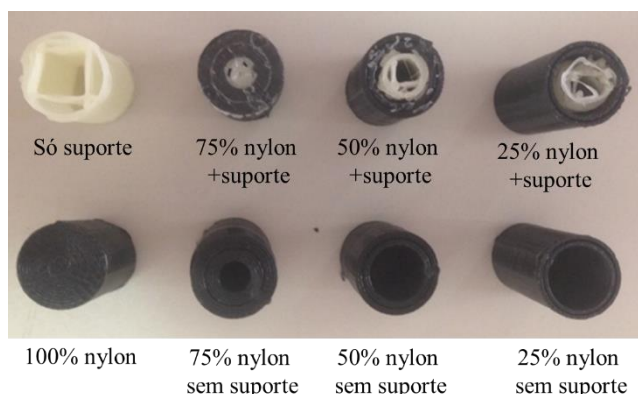


Figura 20 Provetes obtidos de todos os tipos de configurações.

Quanto à massa das peças produzidas, podemos verificar na Figura 21 que, tal como esperado, os provetes com suporte têm maior massa sendo que a diferença máxima de massa obtida entre os modelos com suporte e sem suporte foi de 0,4484 g e foi verificada nos provetes de 25% nylon.

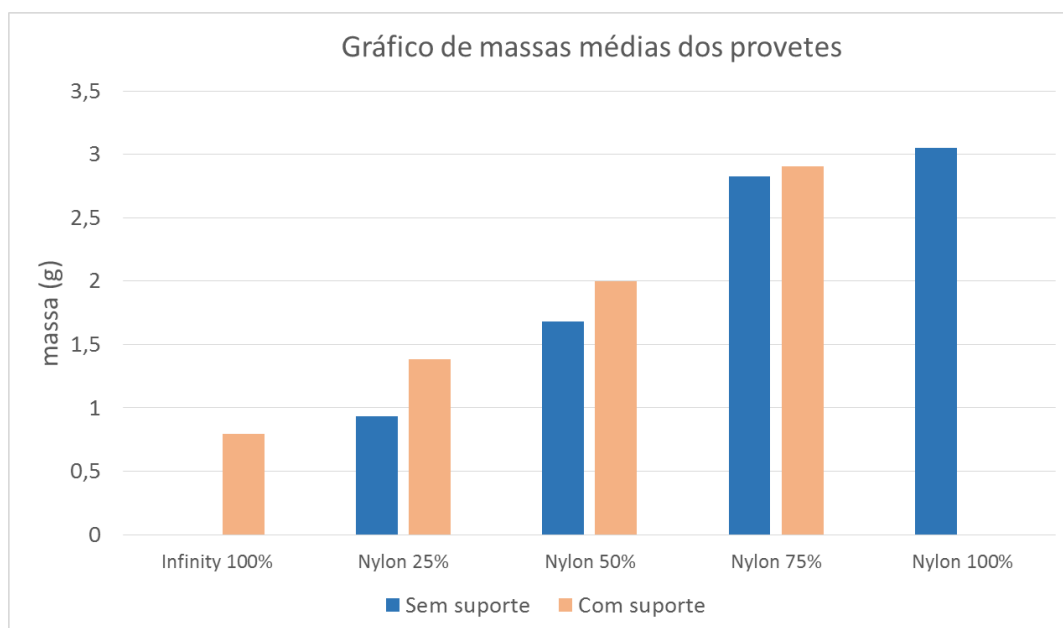


Figura 21 Comparação das massas dos provetes com e sem suporte.

4.2. Ensaio de compressão

Na Figura 22 é mostrada o aspeto das deformações que ocorrem durante o ensaio de compressão. Na Figura 23 e na Figura 24 são mostradas as relações de força-deslocamento para os provetes de 25% de *nylon* sem suporte e com suporte respetivamente de onde foi retirada a curva média.



Figura 22 Deformações observadas durante os ensaios de compressão.

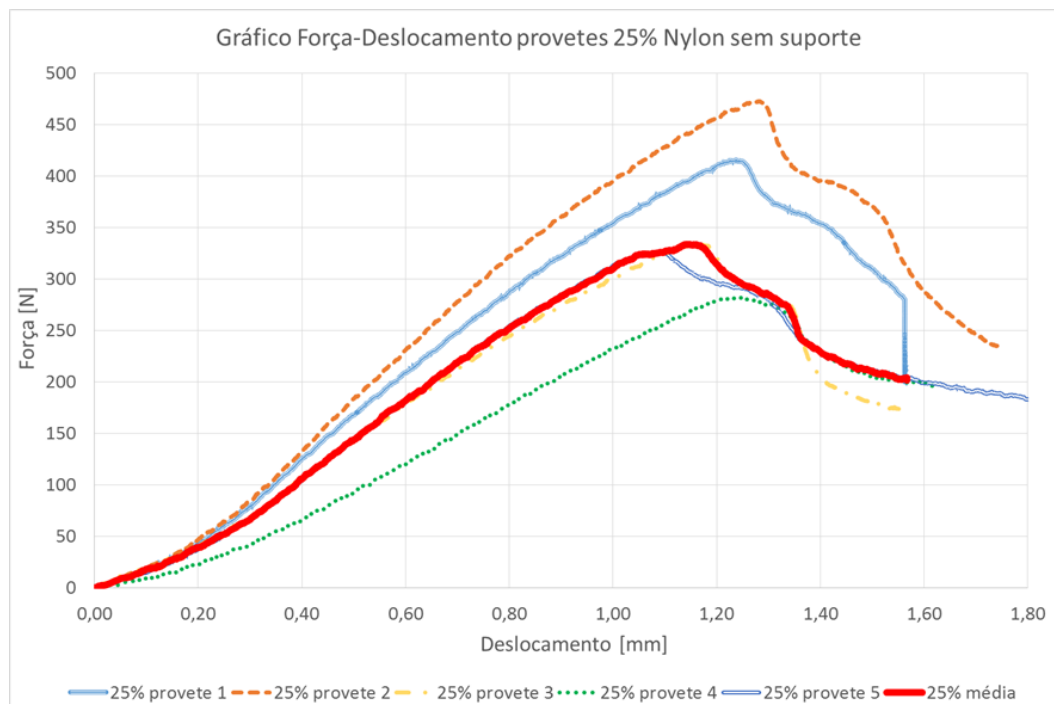


Figura 23 Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon sem suporte.

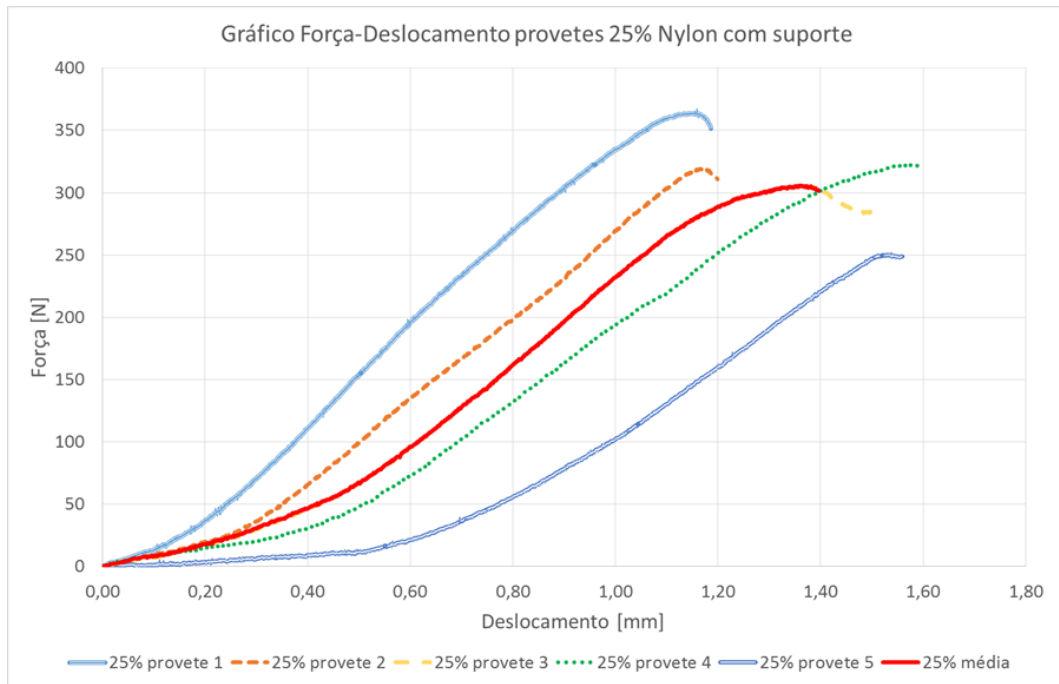


Figura 24 Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon com suporte.

Ao analisar as curvas força-deslocamento médias e as suas comparações entre provetes com e sem material de suporte presentes da Figura 25 à Figura 27 foi possível, em primeiro lugar, verificar que o comportamento mecânico do *nylon* e do *infinity* são muito idênticos, uma vez que os gráficos de força-deslocamento apresentados têm curvas muito semelhantes ao longo da força que foi aplicada, embora com valores para comportamento mecânico bem distinto. Foi possível observar que ambos os materiais têm um elevado domínio elástico e que esse não varia consideravelmente com a introdução de estruturas de suporte na peça.

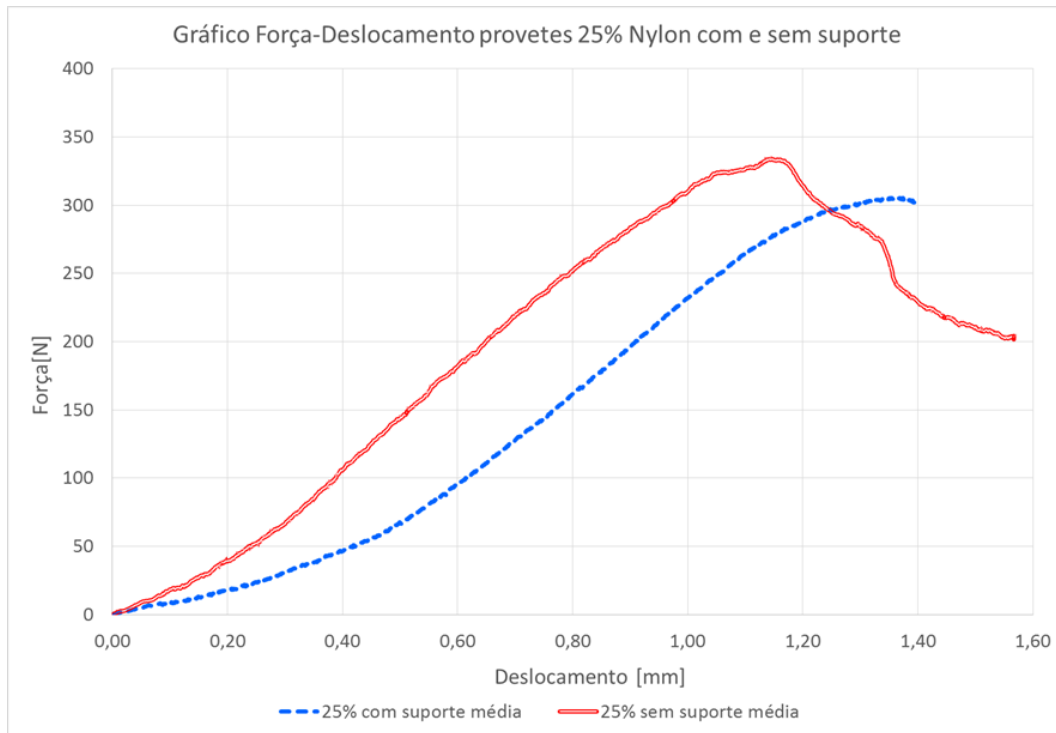


Figura 25 Comparação Curvas médias Força-Deslocamento 25% Nylon com/sem suporte.

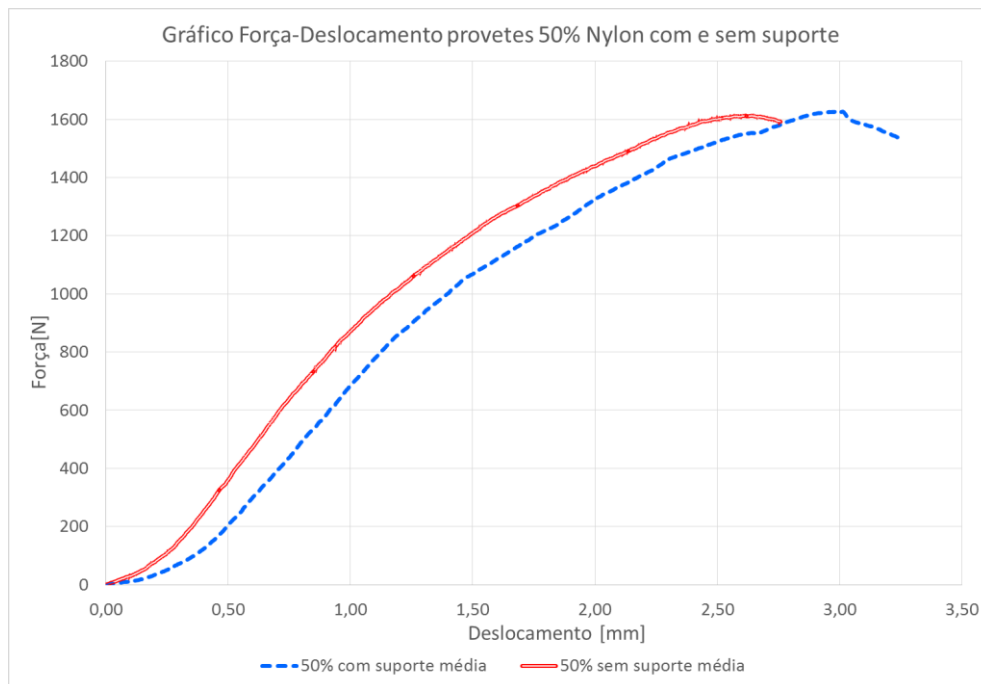


Figura 26 Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 50% Nylon com e sem suporte.

Nestas figuras à medida que a percentagem de material (nylon) aumenta, o contributo da existência de estrutura de suporte é o de reduzir a capacidade do componente resistir a cargas de compressão.

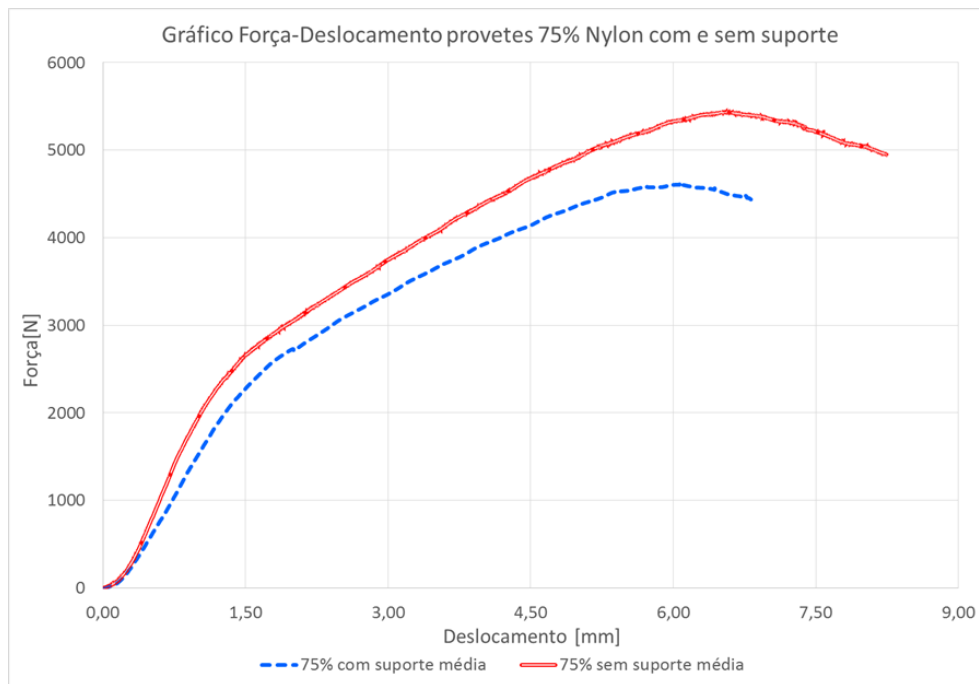


Figura 27 Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 75% Nylon com e sem suporte.

A Figura 28 e a Figura 29 mostram as curvas Força-Deslocamento para provetes com 100% *nylon* e para 100% *infinity* respetivamente. É de observar que a dispersão de resultados para o caso dos provetes em *infinity* é muito elevada. Este facto é devido à forma de construção dos provetes em *nylon* ser uma estrutura mais maciça que os observados para o *infinity*. No caso da construção dos provetes em *infinity* a estrutura é muito mais porosa e o seu comportamento é bastante influenciado pela forma geométrica dessa estrutura.

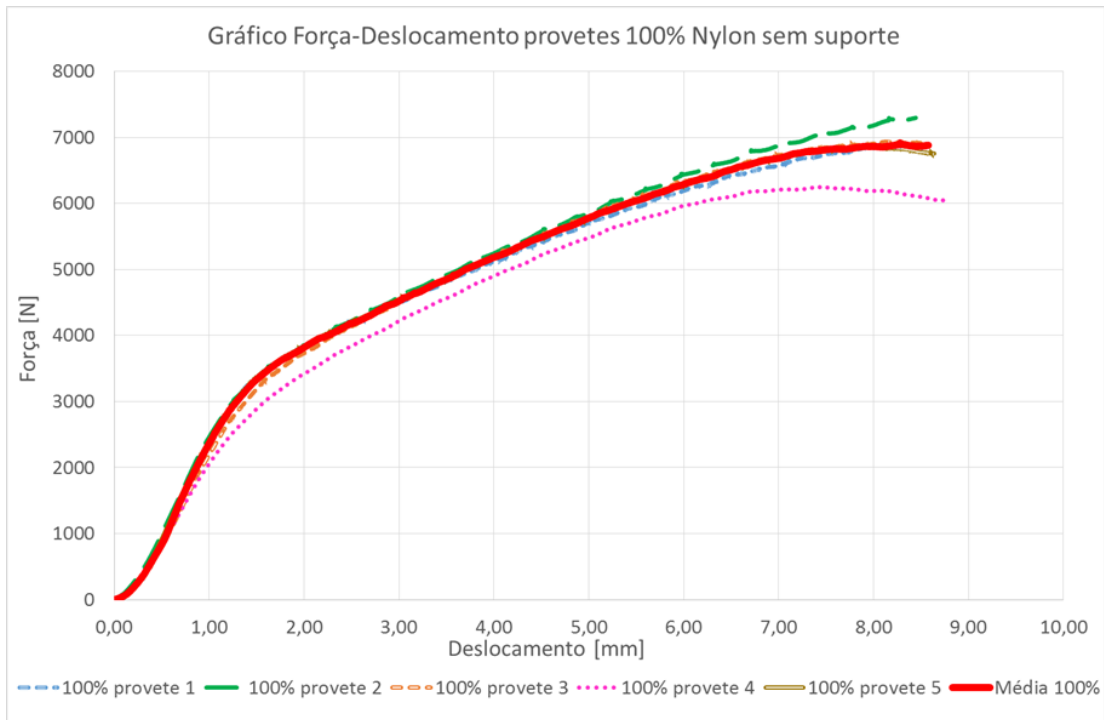


Figura 28 Curvas Força-Deslocamento 100% Nylon.

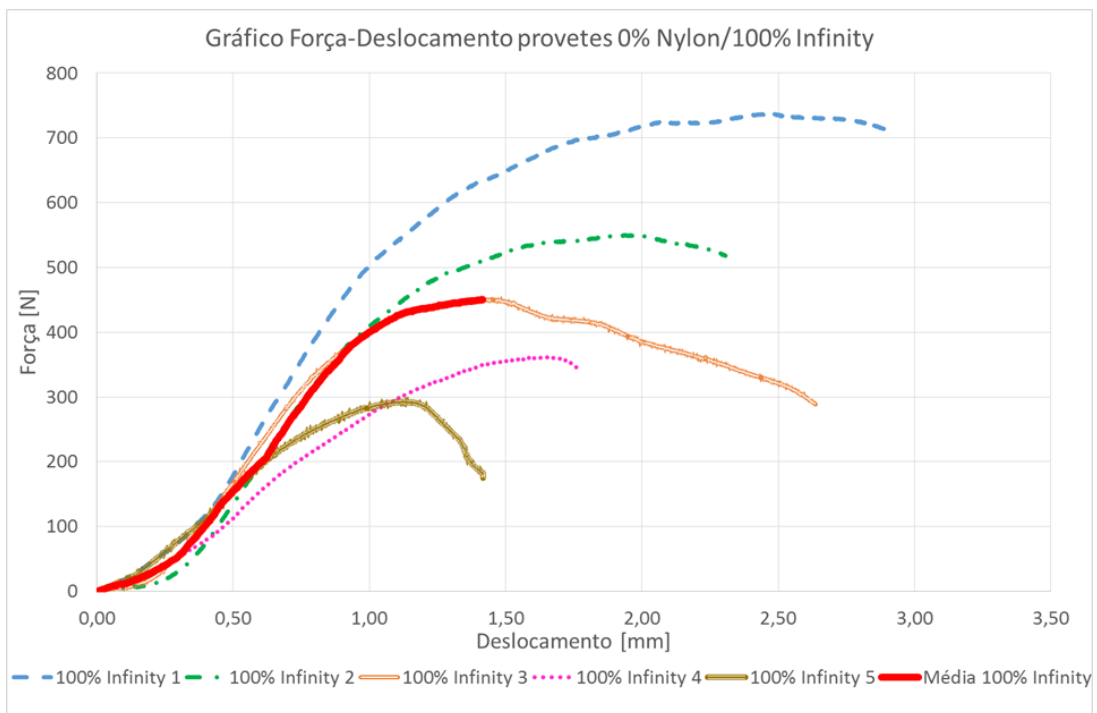


Figura 29 Curvas Força-Deslocamento 0% Nylon / 100% Infinity.

Verifica-se, ainda que quanto maior é o volume de *nylon* relativamente ao volume de *infinity*, mais resistente é a peça testada como se verifica na Figura 30 para provetes sem suporte e na Figura 31 para provetes com suporte. Isto permite confirmar que o *nylon* tem maior resistência mecânica quando construído autonomamente do que quando construído com estruturas de material de suporte.

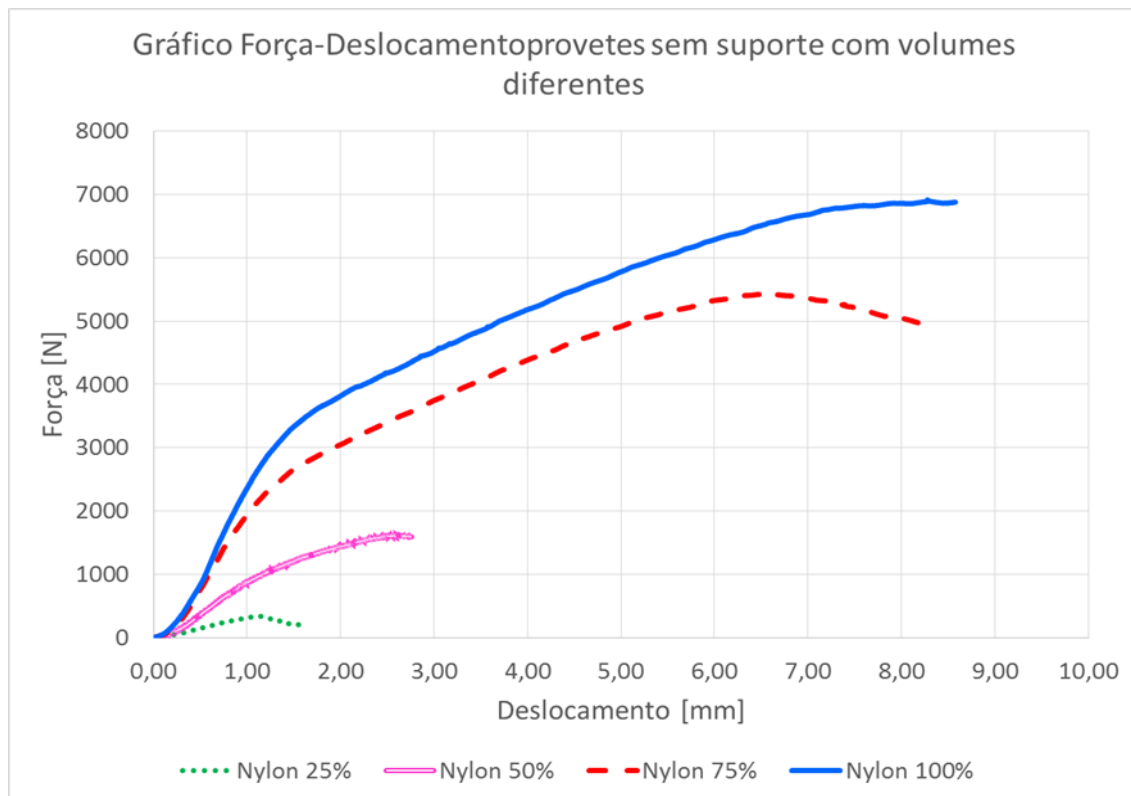


Figura 30 Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações sem suporte.

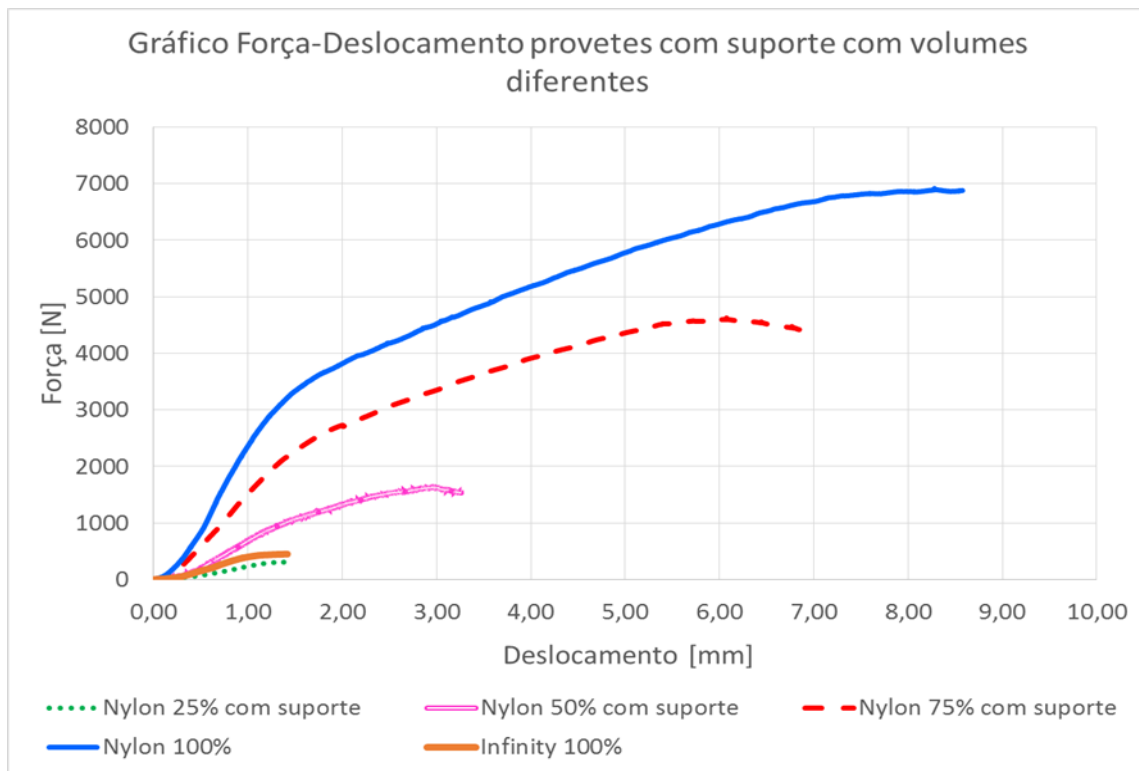


Figura 31 Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações com suporte.

Quanto à carga máxima que os componentes resistem, na Figura 32 é possível visualizar as diferenças entre as forças máximas para todas as configurações de provetes.

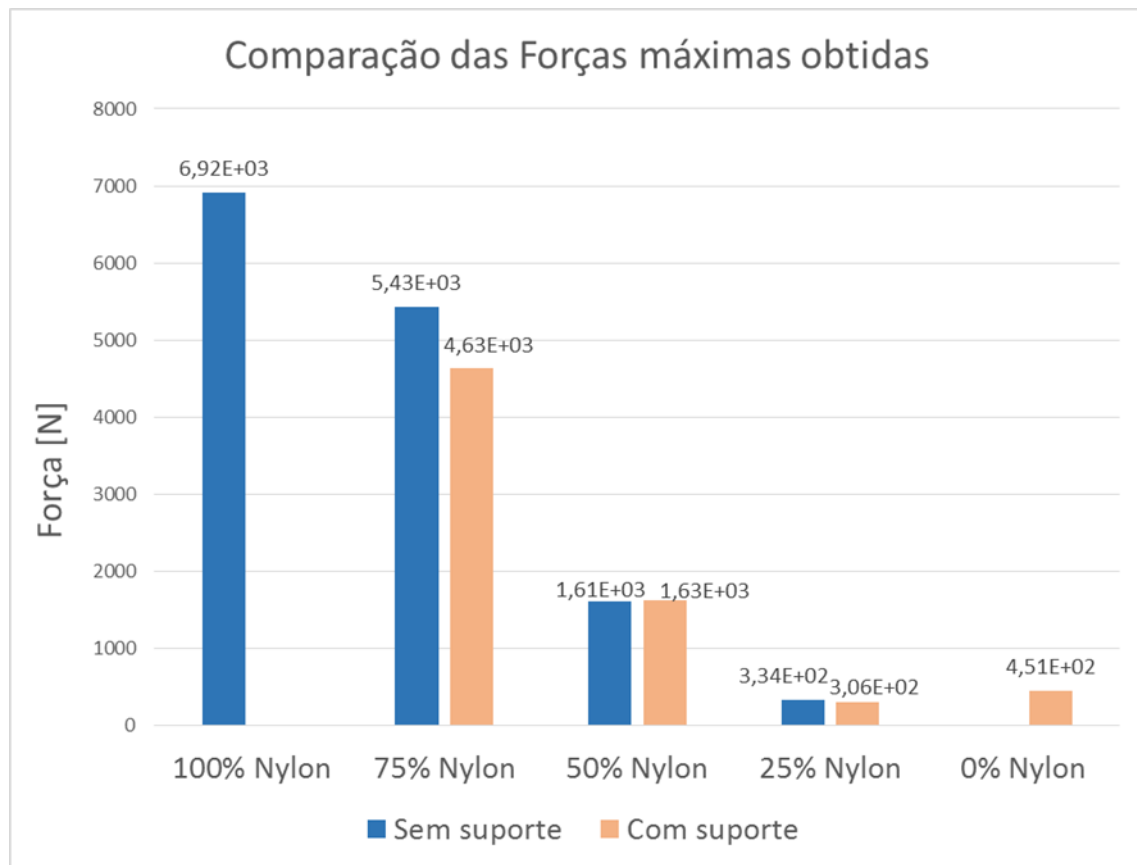


Figura 32 Resultado das forças máximas obtidas.

Nas curvas obtidas nos ensaios de compressão foi possível verificar ainda que, na generalidade dos casos estudados, os provetes com estrutura de suporte demonstraram ter uma menor resistência à compressão do que os provetes com o mesmo volume de *nylon* mas sem suporte interno. Uma das possíveis causas para estes resultados prende-se com o facto do tempo de construção dos provetes com suporte face aos mesmos sem suporte ser sempre superior; isto é, cada camada de construção está mais tempo a ser executada devido ao facto de serem usados dois materiais na mesma camada. Desta forma, o primeiro material depositado vai baixando de temperatura à medida que está a ser depositado material de suporte na mesma camada, isto pode fazer com que esta camada diminua a aderência necessária à camada que será construída posteriormente.

Segundo estes dados é possível concluir que ao criar uma peça produzida por este processo é muito importante prever se de facto a peça necessita ou não de suporte pois, como avaliado anteriormente, caso exista material de suporte, a peça irá demorar mais

tempo a produzir e esse fator terá impacto negativo na resistência mecânica da peça final produzida.

Para validar esta avaliação foi efetuado uma nova análise, Figura 33, em que foi comparada a força máxima de resistência à compressão com a massa de cada provete. Esta comparação surgiu pelo facto de não ser possível calcular as tensões de cedência e rotura dos provetes. Esta incapacidade deve-se, como já discutido anteriormente, à forma como é gerada a estrutura de suporte que não é possível controlar e assim não se consegue determinar de forma efetiva a área da secção resistente.

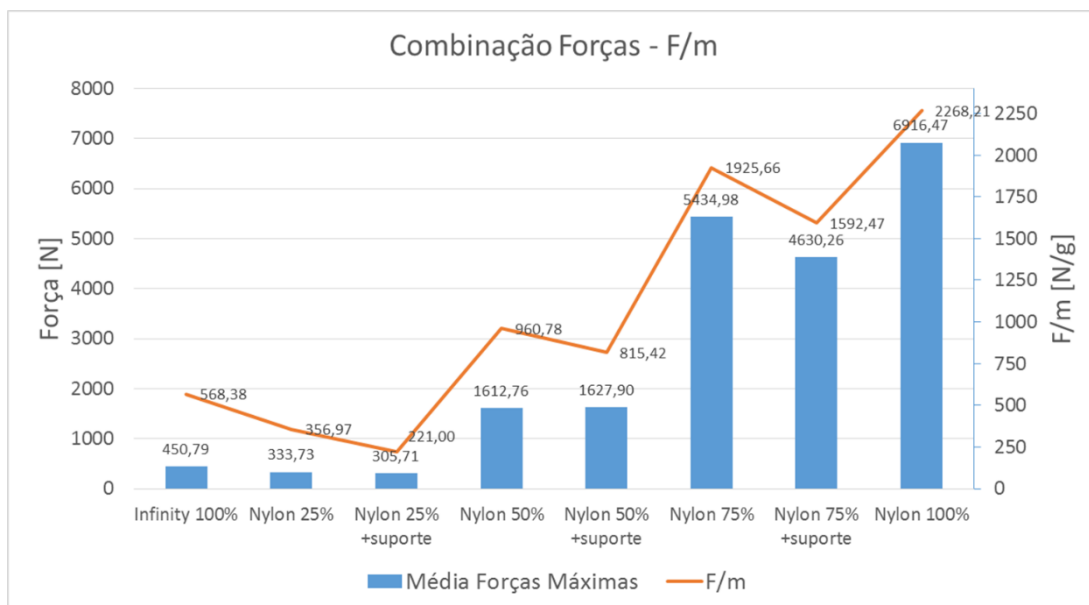


Figura 33 Combinação dos dados das forças máximas com as massas dos provetes

É de notar na Figura 33 que a força resistente de compressão diminui cerca de 9% dos provetes Nylon 25% para os Nylon 25% com suporte, enquanto que a relação F/m decresce em 38%. Comparando o caso dos provetes Nylon 50% sem e com suporte, embora a força resistente aumente residualmente com a existência de suporte (aproximadamente 1%), já a relação F/m decresce 15%. Finalmente o caso de Nylon 75%, a força resistente decresce 15% enquanto que a relação F/m diminui 17%.

Com esta análise fica claro que o contributo da existência das estruturas de suporte em componentes é negativo para a resistência mecânica dos componentes. É então sugerido que sejam adotadas estratégias de construção que eliminem o recurso a estruturas de suporte, sabendo que em alguns casos apenas recorrendo a estas os componentes ficam devidamente construídos e geometricamente corretos.

5. Conclusões

Com este trabalho foi possível avaliar mecanicamente componentes produzidos pelo processo FDM com e sem estruturas de suporte. Para tal foram desenvolvidas várias configurações de provetes sem material de suporte e outros com material de suporte.

Foi possível analisar o processo de produção aditiva, nomeadamente o FDM. Neste processo foi verificado que a resistência mecânica das peças finais produzidas é influenciada de forma negativa pelas estruturas de suporte. Conclui-se que o suporte gerado para produzir a peça final com sucesso tende a diminuir a resistência à compressão do componente. Pode ser indicado como causa dessa diminuição o tempo de construção ser mais longo devido à alternância de utilização das cabeças de extrusão de um material (construção) para outro (suporte) fazendo com que exista uma diminuição de aderência entre as camadas.

Segundo os dados obtidos pode concluir-se que o planeamento de produção das peças produzidas pela tecnologia FDM é muito importante a nível de redução de tempos e qualidade final das mesmas. Sabendo que algumas geometrias, no FDM, só podem ser geradas com recurso a estruturas de suporte é de salientar o incremento no tempo de fabrico de componentes e a diminuição de resistência mecânica com a existência deste tipo de estruturas.

Trabalhos futuros

Após a conclusão deste trabalho é possível sugerir outros estudos que poderão ser feitos neste âmbito de forma a melhorar o conhecimento das propriedades mecânicas de peças construídas por produção aditiva, tais como:

- Avaliar a influência das alterações dos parâmetros presentes no *software* na construção do suporte na resistência final do material de suporte;
- Avaliar a resistência mecânica do suporte criado com diferentes estratégias de deposição desse mesmo material;
- Caracterizar mecanicamente o material de suporte fabricado por outro tipo de processos de produção aditiva;
- Estudar a resistência mecânica do suporte quando sujeito a diversos fatores externos (como humidade e temperatura) de modo a entender a decisão de manter ou não este material depois da peça concluída;
- Estudar qual a influência na resistência mecânica das peças o tempo de construção e a quantidade de peças produzidas em simultâneo.

Bibliografia

3D Systems, 2016. *3D Systems*. [Online]
Available at: <http://www.3dsystems.com/>
[Acedido em 25 08 2016].

Ahn, D., Kweon, J.-H. & Lee, S., 2012. Quantification of surface roughness of parts by laminated object manufacturing. *Jornal of Materials Processing Technology*, Volume 212, pp. 339-346.

Alexander, P., Allen, S. & Dutta, D., 1998. Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Desing*, 30(5), pp. 343-356.

ASTM, s.d. *ASTM Internacional*. [Online]
Available at: <http://www.astm.org/>
[Acedido em 3 2016].

CHUA, C. K., LEON, K. F. & LIM, C. S., 2003. *Rapid Prototyping*. s.l.:World Scientific.

CustomPartNet, 2009. *custompart.net*. [Online]
Available at: <http://www.custompartnet.com/>
[Acedido em 25 08 2016].

Jarvinen, J.-P., Matilainen, V., Li, X. & Piili, H., 2014. *Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel*. s.l., ELSEVIER.

Kamrani, A. K. & Nasr, E. A., 2006. *Rapid Prototyping, Theory and Praticce*. New York: Springer.

Kulkarni, P., Marsan, A. & Dutta, D., 2000. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*.

L.M. Galantucci, F. L. G. P., 2008. Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.

Marsan, A. & Dutta, D., 1997. *A survey of process planning techniques for layered manufacturing*. s.l., Elsevier.

Nidagundi, V. B., Keshavamurthy, R. & Prakash, C. P. S., 2015. *Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modeling Process*. s.l., ELSEVIER.

Noorani, R., 2006. *Rapid Prototyping - Principles and Applications*. s.l.:Wiley.

Strano, G., Hao, L., Everson, R. & Evans, K., 2012. A new approach to the design and optimisation of support structure in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Yu-an, J., Yong, H. & Jian-zhong, F., 2015. Support generation for additive manufacturing based on sliced data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.