

ANÁLISE AO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEÇAS PRODUZIDAS COM ESTRUTURAS DE SUPORTE POR FDM

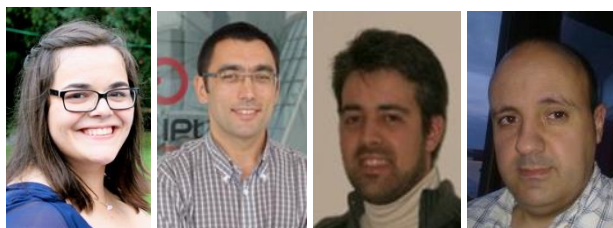
MECHANICAL BEHAVIOR ANALYSIS OF COMPONENTS PRODUCED WITH SUPPORT STRUCTURES BY FDM

J. Martins¹, M. S. Correia^{1,2}, H. A. Almeida¹, J. C. Vasco^{1,3}

¹Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

²CEMMPRE - Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos, Universidade de Coimbra,

³IPC/I3N, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal



RESUMO

A fabricação aditiva tem vindo a ganhar cada vez mais importância no contexto atual pois permite criar protótipos de forma rápida para visualização, assim como a verificação da funcionalidade do modelo. Na fabricação aditiva, o material de suporte gerado para auxiliar na construção tem elevada importância no tempo consumido e no custo do processo, sendo que em algumas situações, essas estruturas de suporte ficam inseridas no próprio modelo físico gerado. O principal objetivo deste trabalho é a caracterização mecânica de modelos/componentes que contenham o material de suporte gerado aquando da construção da peça final pretendida. Neste estudo exploratório, pelos dados obtidos, é possível concluir que o material de suporte nem sempre contribui para o aumento da resistência mecânica das peças produzidas.

ABSTRACT

Additive manufacturing plays an important role in the current context since it enables to create rapid prototypes for visualization, as well as to verify the model's functionality. In additive manufacturing, the support material generated to assist in the building process has high importance in the time consumed and in the process cost, in some situations, these support structures are inserted into the generated physical model itself. The main objective of this research work is the mechanical characterization of models/components that contain the support material generated during the construction of the desired final piece. In this exploratory study, from the data obtained, it is possible to conclude that the support material does not always contribute to the increase of the mechanical resistance of the produced parts.

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 (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 (Galantucci, 2008).

Na maioria dos casos os processos de fabrico aditivo 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.*, 2014).

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 requer consumo de tempo, energia e material, assim o tempo de fabricação do componente aumenta (Almeida e Correia, 2016). Assim a quantidade de material gasto para construir as estruturas de suporte pode afetar de forma significativa os custos de produção. 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 (Gibson *et al.*, 2015). De facto, a remoção de suporte e o acabamento super-

ficial 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 (Rosen, 2014). 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 o mais rápido e mais barato mas sem comprometer a resistência mecânica pretendida para o protótipo (Almeida e Correia, 2016; Kotliniski, 2014; Sood *et al.*, 2012; Majewski e Hopkinson, 2011; Quintana *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2007). 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 num equipamento FDM comercial foram dos seguintes materiais; nylon, nylon com suporte de *Infinity™ Rinse-away Support Material* e provetes apenas de *Infinity™ Rinse-away Support Material*. Foram elaboradas diversas geometrias para se conseguir comparar e relacionar o contributo das estruturas de suporte no comportamento mecânico.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E METODOLOGIA

2.1. 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 um dos principais materiais utilizado em fabricação aditiva pelas tecnologias de sinterização por laser e também por FDM (Kamrani & Nasr, 2006).

Para o material de suporte, foi usado o material designado por *Infinity™ Rinse-away Support Material* 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 nas Tabela 1 e 2.

2.2. Geometria dos Provetes

De acordo com a norma ASTM D695, os provetes terão as dimensões representadas na Fig. 1 a).

Para que fosse possível o *software* admitir o material de suporte, foi considerado que os provetes teriam que ser ocos por dentro e também que tivessem uma estrutura suspensa no topo da mesma para que fosse possível através do controlo do *software* gerar o material de suporte necessário, como pode ser verificado na Fig. 1 b). Ainda nesta figura é possível observar (através da indicação da seta) 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 Fig. 1 c).

De modo a conseguir avaliar a influência da espessura da parede através do volume sólido relativamente ao volume de material de

Tabela 1 – Características e aplicações do Infinity (adaptado de 3D Systems,2016)

<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material de suporte; • Dissolve-se em água; • Seguro para esgotos domésticos; • Permite complexidade; • Permite movimento.
<p>Aplicações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geometrias anteriormente não possíveis nas impressoras; • Estatuetas maleáveis; • Saliências/impressões dentro de impressões.

Tabela 2 – Características e aplicações do Nylon (adaptado de 3D Systems,2016).

<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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.
<p>Aplicações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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.

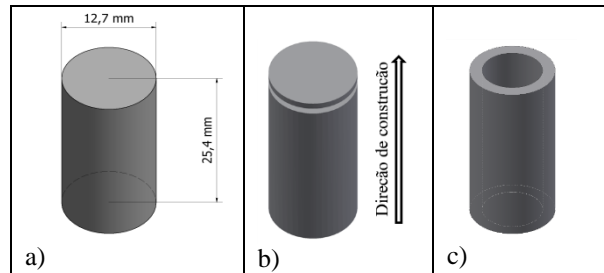


Fig 1 - a) dimensões iniciais dos provetes e configuração dos provetes para: b) fabrico; c) testes

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 foram definidas as seguintes configurações:

- 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.

O sistema CAD *Inventor* 2016 foi usado

para criar os arquivos STL que foram interpretados e manipulados pelo software *CubePro* 2016 desenvolvido pela marca da máquina.

2.3. Produção dos Provetes

Neste trabalho foi utilizada a máquina de prototipagem rápida *CubePro Duo* (Fig. 2) 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.



Fig 2 – *CubePro Duo* (3D Systems, 2016).

O número de provetes a produzir tendo em conta as indicações da norma são cinco provetes de cada configuração, ou seja 5x8 configurações=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 Fig. 3.

Estes provetes terão composições diferentes devido às diferenças de volume de material existente, no entanto, a espessura de camada (*Layer Resolution*), o tipo de preenchimento interior (*Print Strenght*) e o tipo de preenchimento interior (*Print Pattern*) foi definido com os mesmos parâmetros, 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 3, foram definidos o tipo de impressão “*Diamonds*” que corresponde a um padrão de impressão forte

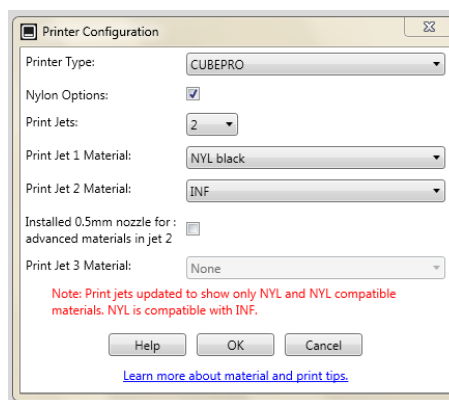


Fig 3 - Definição dos parâmetros iniciais da impressora.

Tabela 3 – Parâmetros de fabricação do Software.

<i>Print Pattern</i>	<i>Strong</i>	<i>Almost Solid</i>	<i>Solid</i>
<i>Print Strenght</i>	<i>Diamonds</i>		<i>HoneyComb</i>

com três direções de suporte em cruz e a força de impressão “*Solid*” que preenche a camada sem espaços vazios.

A definição destes parâmetros tiveram por base os fatores que o *software* da máquina utilizada nos permite alterar, para este material não é possível modificar a espessura de camada (*Layer Resolution*) que é fixa para todos os provetes. A Fig. 4 permite visualizar o menu onde é possível seleccionar os parâmetros de impressão pretendidos.

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

2.4. Ensaios de compressão

Os ensaios mecânicos de compressão foram realizados na máquina de ensaios universais *ZWICK Z100* (Fig. 5) do Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria.

Foi utilizada ainda uma balança analítica para obter os valores da massa de cada um dos provetes produzidos.

2.4. Produção dos Provetes

Estes ensaios de compressão foram realizados conforme a norma ASTM D695 a uma velocidade de 1 mm/min e à temperatura ambiente. Cada provete foi tes-

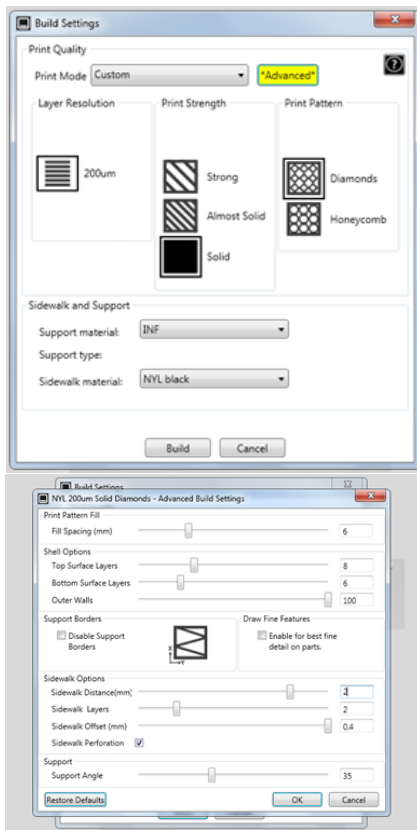


Fig 4 – Seleção dos parâmetros de impressão no software.



Fig 5 – Máquina para ensaios de compressão.

tado 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 Fig. 6.

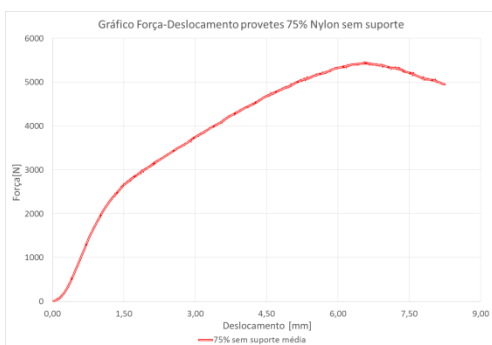


Fig. 6 – Exemplo de curva força-deslocamento obtida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção dos provetes

A Fig. 7 mostra a simulação da fabricação dos provetes em duas vistas diferentes e a Fig. 8 o resultado verdadeiramente obtido após a produção dos mesmos. Nesta imagem é possível observar os provetes com 50% de volume sólido com suporte. Na Fig. 9 são mostrados os provetes sem suporte obtidos após a produção e pós-processamento. As Figs. 9 e 10 mostram os provetes obtidos sem suporte e com suporte respetivamente. Os provetes foram construídos cinco de cada vez, ou seja, cinco de cada tipo de uma vez.

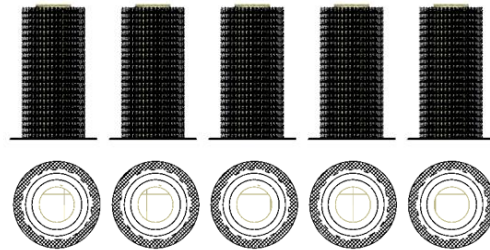


Fig 7 – Resultados no software do provete 50% de nylon com suporte.



Fig 8 – Resultado obtido após fabricação e pós-processamento dos provetes 50% nylon com suporte.



Fig 9 – Provetes sem suporte obtidos.



Fig 10 – Provetes com suporte obtidos.

Na Fig 11 é possível observar os provetes obtidos com material de suporte (linha de cima) e os mesmos obtidos sem material de suporte (linha de baixo).

Quanto à massa das peças produzidas, podemos verificar na Fig. 12 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.

3.2. Ensaios de compressão

Na Fig. 13 é mostrada o aspeto das deformações que ocorrem durante o ensaio de compressão. Na Fig. 14 e na Fig. 15 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.

Ao analisar as curvas força-deslocamento médias e as suas comparações entre

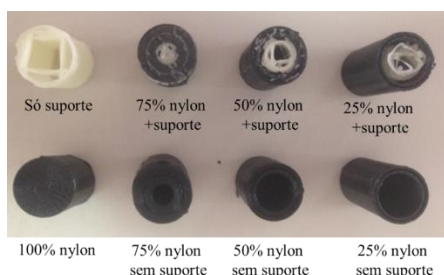


Fig 11 – Provetes obtidos de todos os tipos de configurações.

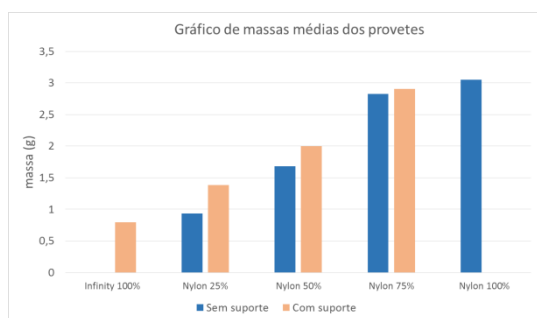


Fig 12 – Comparação das massas dos provetes com e sem suporte.



Fig 13 – Deformações observadas durante os ensaios de compressão.

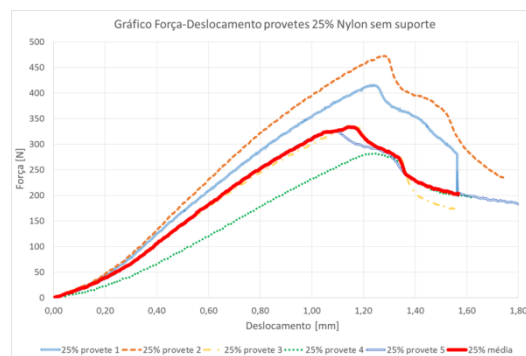


Fig 14 – Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon sem suporte.

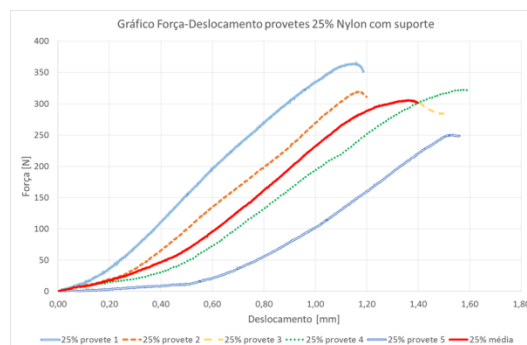


Fig 15 – Curvas Força-Deslocamento 25% Nylon com suporte.

provetes com e sem material de suporte presentes nas Fig. 16 à Fig. 18 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.

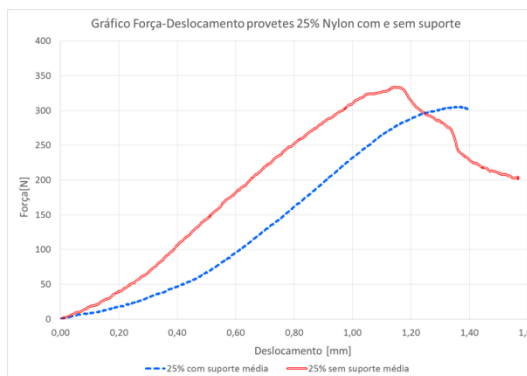


Fig 16 – Comparação Curvas médias Força-Deslocamento 25% Nylon com/sem suporte.

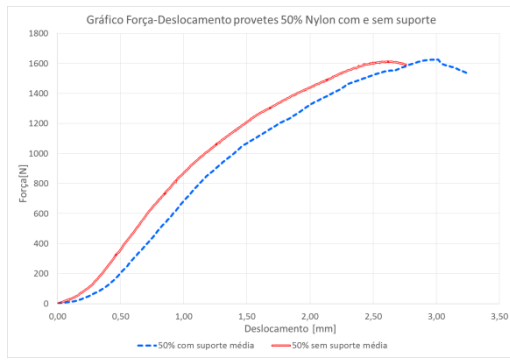


Fig 17 – Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 50% Nylon com e sem suporte.

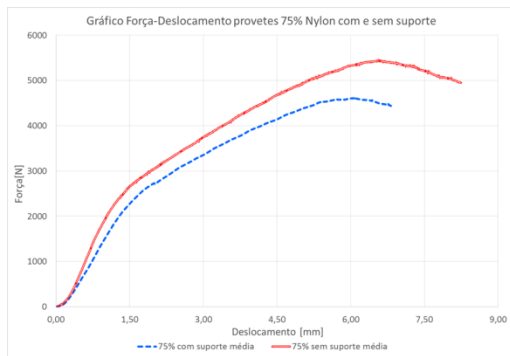


Fig 18 – Comparação Curvas Médias Força-Deslocamento 75% Nylon com e sem suporte.

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.

As Figs. 19 e 20 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.

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 Fig. 21 para provetes sem suporte e na Fig. 22 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.

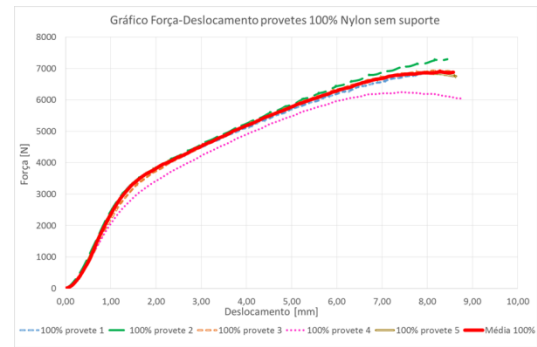


Fig 19 – Curvas Força-Deslocamento 100% Nylon.

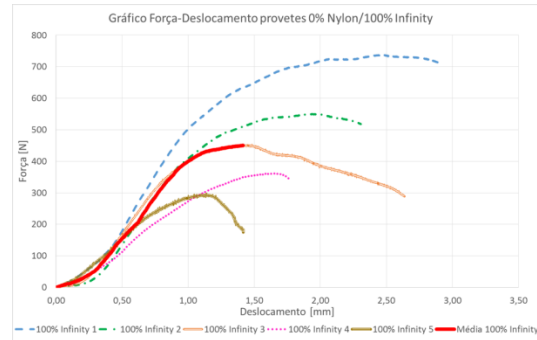


Fig 20 – Curvas Força-Deslocamento 0% Nylon / 100% Infinity.

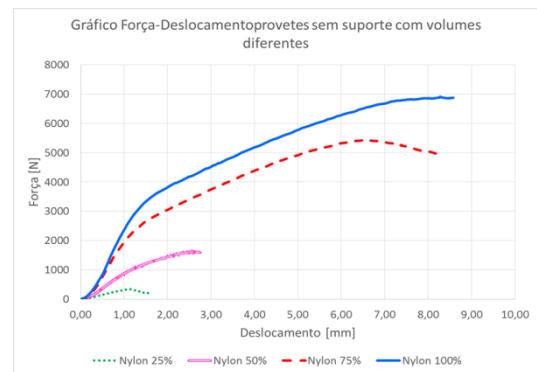


Fig 21 – Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações sem suporte.

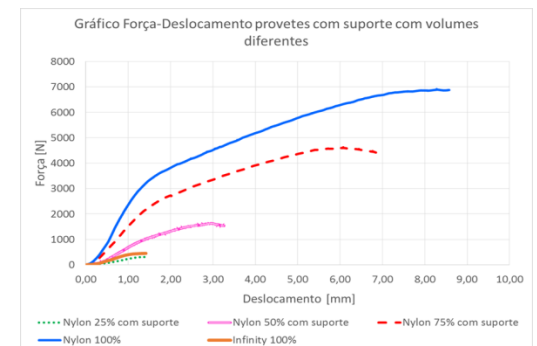


Fig 22 – Comparação da curva Força-Deslocamento para diferentes configurações com suporte.

Quanto à carga máxima que os componentes resistem, na Fig. 23 é possível visualizar as diferenças entre as forças máximas

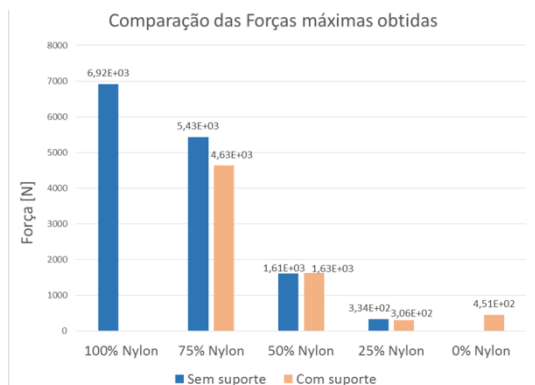


Fig 23 – Resultado das forças máximas obtidas.

para todas as configurações de provetes.

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, Fig. 24, 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 a tensão de cedência e rotura dos provetes. Esta incapacidade deve-se, como já

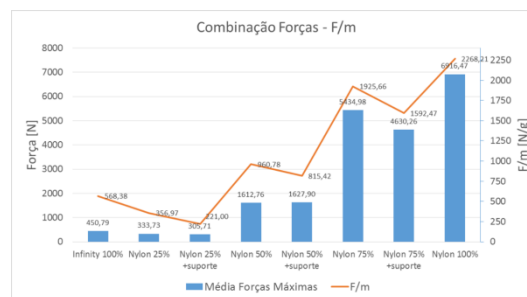


Fig 24 – Combinação dos dados das forças máximas com as massas dos provetes

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.

É de notar na Fig. 24 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, devido à metodologia de construção com recurso a dois materiais e com duas cabeças de extrusão distintas que extrudem material de construção e material de suporte de forma alternada. 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.

4. 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 construídas.

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.

REFERÊNCIAS

- 3D Systems, 2016. 3D Systems. [Online] Available at: <http://www.3dsystems.com/> [Acedido em 25 08 2016].
- Almeida, H.A., Correia, M.S. (2016) “Sustainability impact evaluation of support structures in the production of extrusion based parts”, Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing (Vol. I), S.S. Muthu & M.M. Savalani (Eds.), Springer (ISBN 978-981-10-0549-7), 7-30.
- ASTM, s.d. ASTM Internacional. [Online] Available at: <http://www.astm.org/> [Acedido em 3 2016].
- Chua, C.K., Leong, K.F. (2014) “3D Printing and Additive Manufacturing – Principles and Applications”, 4th Edition, World Scientific Publishing.
- Galantucci, L.M., 2008. Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts. CIRP Annals - Manufacturing Technology.
- Gibson, I., Rosen, D. Stucker, B. (2015) “Additive Manufacturing Technologies – 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing”, 2nd Edition, Springer, New York.
- Kamrani, A. K. & Nasr, E. A., 2006. Rapid Prototyping, Theory and Practice. New York: Springer.
- Kotlinski, J. (2014) “Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials”, Rapid Prototyping Journal, 20(6):499-510.
- Majewski, C., Hopkinson, N. (2011) “Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of laser sintered nylon-12 parts”, Rapid Prototyping Journal, 17(3):176-180.
- Quintana, R., Choi, J.W., Puebla, K., Wicker, R. (2010) “Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography-manufactured ASTM D-638 type I specimens”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46:201-215.
- Rosen, D. (2014) “What are the principles for design for additive manufacturing?”, Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM2014), C.C. Kai et al (Eds.), Research Publishing Services, 85-90.
- Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S. (2012) “Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement”, Journal of Advanced Research, 3(1):81-90.
- 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.