

Avaliação do efeito da posição de construção no comportamento mecânico em componentes produzidos por fabrico aditivo – extrusão de material

Evaluation of the effect of the building position on the mechanical behaviour of components produced by additive manufacturing – material extrusion

Mário S. Correia^{1,2} | Rui B. Ruben^{1,3}

¹ ESTG, Instituto Politécnico de Leiria, Portugal

² Universidade de Coimbra, CEMMPRE, ARISE, Portugal, mario.correia@ipleiria.pt

³ CDRsp, Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, rui.ruben@ipleiria.pt

resumo

Das categorias de Fabricação Aditiva, o processo baseado na extrusão de material – Fused Deposition Modeling (FDM), que utiliza a deposição de filamento fundido de materiais poliméricos camada a camada, é o que se apresenta mais simples e acessível. Na construção de componentes podem ser alterados diversos parâmetros de processamento, sendo que dois são a posição de construção e a percentagem de preenchimento interno dos componentes a produzir. Neste trabalho, foi efetuada uma análise ao comportamento mecânico de compressão, através de ensaios num equipamento universal de ensaios mecânicos, com as amostras com diferentes percentagens de preenchimento com padrão de preenchimento linear de 20, 40, 50, 75 e 100%. Para além da variação do preenchimento interno, foram produzidas amostras na horizontal e na vertical utilizando as mesmas condições de processamento. O comportamento mecânico à compressão é favorecido para as construções na vertical, em que as camadas depositadas ficam perpendiculares à direção da deformação imposta no ensaio de compressão. Esse comportamento mecânico também apresenta melhores resultados com o aumento da percentagem de preenchimento.

Palavras-chave: Fabrico aditivo, Comportamento mecânico, Direção de construção, Preenchimento

abstract

Of the Additive Manufacturing categories, the process based on material extrusion – Fused Deposition Modelling (FDM), which uses fused filament deposition of polymeric materials layer by layer – is the simplest and most accessible. In the construction of components, various processing parameters can be altered, two of which are the construction position and the percentage of internal infill of the components to be produced. In this work, an analysis of the mechanical behaviour in compression was carried out using tests on a universal mechanical test rig, with the samples having different percentages of filling with a linear infill pattern of 20, 40, 50, 75 and 100%. In addition to varying the internal infill, samples were produced horizontally and vertically using the same processing conditions. The mechanical behaviour to compression is improved for vertical constructions, where the deposited layers are perpendicular to the direction of the deformation imposed in the compression test. This mechanical behaviour also shows better results as the percentage of infill increases.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical behaviour, Build direction, Infill

1- INTRODUÇÃO

O princípio básico do fabrico de produtos inclui os processos de fabrico subtrativo, formativo e aditivo. Entre estas três categorias, o fabrico aditivo é uma tecnologia que utiliza uma construção camada a camada de material para o fabrico de peças utilizando um modelo concebido por computador. O princípio básico envolvido no processo de fabrico aditivo é a geração de um modelo virtual num computador, a posterior divisão desse modelo em secções transversais 2D e a tradução desses dados 2D para um equipamento de Fabrico Aditivo, a fim de fabricar o produto físico camada a camada. Após essa produção o componente é removido da plataforma ou da câmara de construção, limpo e acabado (Gibson et al., 2015). Na figura 1 são evidenciadas estas etapas.

Nos diversos sectores industriais, como o sector médico, automóvel e aeronáutica, a fabricação aditiva tem marcado a sua presença de forma significativa e crescente. A fabricação aditiva permite produzir componentes em diversos materiais e com extrema complexidade geométrica. A classificação dos processos de fabricação aditiva, está realizada através da norma ASTM F42/ISO TC 261. Os processos estão divididos em sete grandes categorias:

- Processos de Fotopolimerização em Câmara;
- Processos de Impressão de Material;
- Processos de Impressão de Aglomerante;
- Processos de Extrusão de Material;
- Processos de Fusão em Camada de Pó;
- Processos de Laminação em Folhas;
- Processos de Deposição Direcionada de Energia.

Assim, dentro destas categorias de Fabricação Aditiva, o processo baseado na extrusão de material - *Fused Deposition Modeling* (FDM), é o que se apresenta como uma das tecnologias e

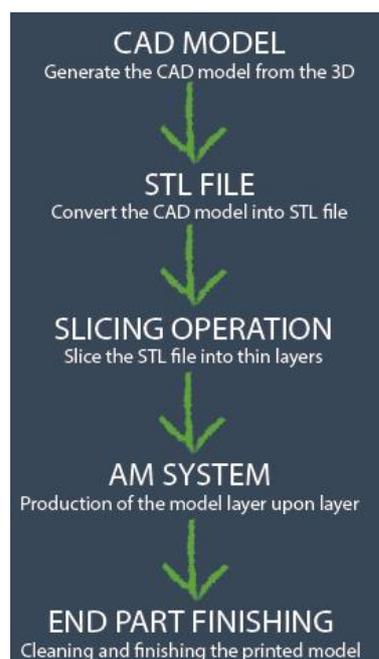


Fig. 1 | Etapas gerais da fabricação aditiva (Lemos et al., 2019)

processos mais simples e acessível. No entanto, a simplicidade do processo de fabrico obriga a uma rigorosa seleção e conjugação dos diferentes parâmetros do processo. Os parâmetros principais são a temperatura de processamento do material, a temperatura da câmara (caso exista) e da plataforma de construção, a espessura da camada, a densidade e o padrão de preenchimento, assim como a posição de impressão do modelo. Todos estes parâmetros em separado e conjugados definem as características físicas e mecânicas resultantes do produto final. Quando algum destes parâmetros está mal definido, o resultado ou as características finais serão fora do requisito de projeto (Pandzic, 2021).

O comportamento mecânico de componentes produzidos por FDM quando solicitados à tração, é claramente afetado pela orientação na produção dos componentes, mas a alteração destes parâmetros de processamento pode ajudar a mitigar estas diferenças (Beattie et al., 2021). Foi analisado o comportamento à tração por Eryildiz (Eryildiz, 2021) e as tensões máximas de tração diminuem 36% quando as amostras são produzidas ao alto comparadas com as produzidas ao baixo. Também Katiyar et. al. no seu trabalho (Katiyar et al., 2022), confirmam essas mesmas tendências no comportamento mecânico à tração dos componentes.

Quanto aos padrões de preenchimento, o preenchimento linear tende a apresentar a tensão de flexão máxima mais elevada e os padrões de triângulos tendem a ter a tensão de flexão máxima mais baixa. Ainda foi possível verificar que as amostras construídas horizontalmente ao baixo tendem a ter um módulo de elasticidade à flexão mais elevado e suportam tensões de flexão mais elevadas. Já a orientação horizontal/lateral a tende a ter maior tensão máxima de flexão em comparação com os outros dois tipos testados. (Rajkumar, 2022).

Num artigo de revisão, Syrlybayev et al. (2021) fizeram o levantamento de diversos parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FDM, entre esses estavam a percentagem de preenchimento e orientação da construção. Nos trabalhos analisados todos os autores concordam que o aumento da densidade de enchimento aumenta a resistência mecânica. Também a maior parte da investigação analisada refere que a orientação das camadas de construção do componente alinhadas com a solicitação mecânica, é mais favorável para um melhor desempenho à tração para componentes produzidos por FDM.

Neste processo é por vezes necessário recorrer a estruturas de suporte para garantir a possibilidade de produzir o componente e também para garantir o rigor dimensional da mesma. A produção destas estruturas de suporte tem algumas desvantagens, nomeadamente, o tempo de máquina para a sua construção, a remoção dessas estruturas, as marcas ou defeitos que ficam no componente depois da sua remoção e o desperdício de material adicional necessário na produção das mesmas (Almeida e Correia, 2016). Outra questão relevante é que quando são produzidas essas estruturas e algumas delas fazem parte integrante do componente produzido, e em alguns casos o desempenho mecânico também pode ser afetado de modo negativo (Martins et.al., 2017).

Foi verificado por Hodzic e Pandzic (2021) que a densidade de preenchimento afeta a resis-

tência à compressão qualquer que seja o padrão de preenchimento que seja utilizado, aumentando a resistência mecânica de modo linear com o aumento da percentagem de preenchimento.

O objetivo deste trabalho é o de analisar a influência da posição de construção do modelo, conjugado com a percentagem de preenchimento no comportamento mecânico à compressão do material PLA produzido por FDM. Conforme descrito pelos autores identificados anteriormente, todos concordam em que o aumento da percentagem de preenchimento aumenta a resistência mecânica. As publicações referidas consideram que, a tensão na rotura é determinada como a razão entre a carga e a área da seção transversal nominal (aparente) sem ter em conta o espaço não preenchido. Aqui existe algum trabalho a ser realizado para se conseguir determinar o volume de preenchimento e daí determinar a real área de seção resistente em função da percentagem de preenchimento. Para este trabalho foi adotado a mesma metodologia na consideração da área de seção resistente.

2- MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste estudo o material utilizado foi um polímero termoplástico, um PLA (Polylactic Acid) da Ultimaker, em filamento de diâmetro 2,85mm, com um MFR de 6,09 g/10min, temperatura de transição vítrea de ~60°C, e temperatura de fusão entre 145-160°C (Tabela 1). De modo a eliminar potenciais variabilidades nos resultados influenciados pela cor do material, os corpos de prova foram produzidos em material de cor branca.

Para a geometria da amostra, foram desenhados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 12,7mm e altura 25,4mm (segunda a norma ASTM D695), para avaliação do comportamento à compressão. Estas amostras foram produzidas em duas direções (horizontal e vertical) para verificar o efeito das camadas de construção no comportamento mecânico.

As amostras foram produzidas na posição indicada na figura 2, na impressora Ultimaker S5

Tabela 1 | Detalhe da ficha técnica PLA da Ultimaker

Basic Data		Printing Parameter	
Filament Typ	PLA	General	
Diameter	2,85 mm	Specific gravity	1,24 g/cm ³ ASTM D1505
Tolerance	0,1 mm	Tensile	
Weight	0,75 kg	Tensile strength	49,5 MPa ISO 527
Lenght	95 m	Tensile modulus	2346,5 MPa ISO 527
Color	Pure white - RAL 9010	Elongation	
Color	white	Elongation at yield	3,3 % ISO 527
		Elongation at break	5,2 % ISO 527
		Flexural	
		Flexural Strength	103 % ISO 178
		Flexural Modulus	3150 ISO 178
		Other	
		Impact Strength	5,1 KJ/m ² ISO 180
		Shore D Hardness	83 D



Fig. 2 | Amostras em PLA cilíndricas construídos na horizontal e na vertical

(figura 3), que tem as características indicadas na tabela 2.

O modelo CAD 3D do cilindro de compressão foi exportado para o formato STL, de forma a poder ser analisado pelo software ULTIMAKER CURA®, utilizado para preparação do modelo e configuração da impressão. Os parâmetros de impressão podem ser verificados na tabela 3 e foram iguais para ambas as direções de construção.



Fig. 3 | Ultimaker S5

Tabela 2 | Características da impressora 3D

Ultimaker S5 – Características	
Tecnologia de impressão	<i>Fused Filament Fabrication (FFF)</i>
Volume de construção	330x240x300 mm
Dimensões de Montagem	495x585x780 mm
Ø do filamento	2.65 mm
Peso	20.6 Kg
Potencia máxima de saída	500 W

Tabela 3 | Parâmetros de impressão (software ULTIMAKER CURA®)

Parâmetro	Grandeza	Posição de construção (Horizontal e Vertical)
Quality	Layer Height	0,15mm
Walls	Wall Thickness	0,8mm
	Wall line Count	2
	Horizontal Expansion	-0,015mm
Top/Bottom	Top/bottom Thickness	1mm
	Top Thickness	1mm
	Top Layers	7
	Bottom Thickness	1mm
	Bottom Layers	7
Infill	Density	20%; 40%; 50%; 75%; 100%
	Pattern	Linear 
Material	Printing Temperature	200°C
	Build Plate Temperature	60°C
Speed	Print speed	70mm/s
Travel		Enable retraction
Cooling	Fan Speed	100%
Support		None
Build Plate Adhesion		Brim

Os ensaios de compressão, foram efetuados no equipamento de ensaios universais da marca ZWICK – Z100, associado ao programa TesteXpertII®, com uma célula de carga de 100 kN e com os acessórios adequados para testes de compressão, como se pode ver figura 4. O ensaio foi realizado com uma velocidade de deformação de 2mm/min.



Fig. 4 | Equipamento Universal de Ensaios Mecânicos: ZWICK - Z100

3- DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Da preparação da impressão no ULTIMAKER CURA® resultaram as simulações do preenchimento linear dos provetes representadas na figura 5. Na figura 5 a) está representada a mudança da direção de preenchimento (*infill*) entre camadas sucessivas para a construção na horizontal, o mesmo sucede para o caso da construção na vertical (Figura 5 b)).

Foi possível analisar os tempos e material necessário para a produção dos componentes. Estes estão refletidos na tabela 4, para a produção do cilindro na vertical e na tabela 5, para a produção na horizontal.

Para as amostras produzidas na vertical, é possível verificar que o tempo de construção não varia com o aumento da percentagem de preenchimento. Efetivamente a área de seção a depositar é sempre a mesma e pequena. Assim o efeito do aumento da percentagem de preenchimento não é relevante. Aqui o tempo do processo está mais relacionado com o número de camadas a produzir para obter a geometria, do que o preenchimento interior.

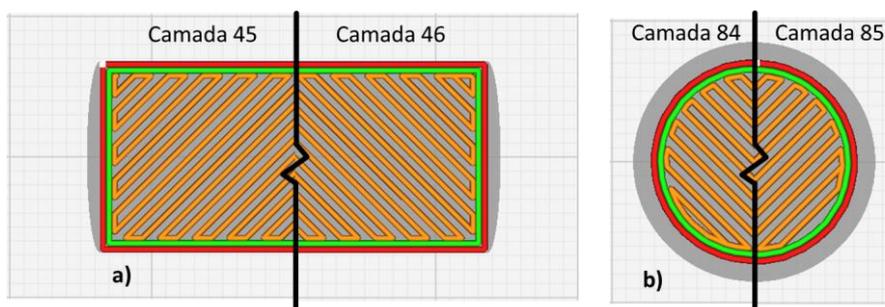


Fig. 5 | Esquema de preenchimento das camadas nos provetes impressos: a) na horizontal e b) na vertical

Tabela 4 | Resultado da impressão das amostras de compressão Vertical

Parâmetros	Grandeza	Percentagem de Preenchimento				
		20%	40%	50%	75%	100%
Tempo de Produção	minutos	17	17	17	17	17
Quantidade de Material	g	2	2	3	3	4
	m	0,24	0,31	0,34	0,43	0,49

Tabela 5 | Resultado da impressão das amostras de compressão Horizontal

Parâmetros	Grandeza	Percentagem de Preenchimento				
		20%	40%	50%	75%	100%
Tempo de Produção	minutos	10	11	12	13	15
Quantidade de Material	g	2	3	3	3	4
	m	0,27	0,32	0,35	0,43	0,49

Pode ser observado que a decisão da posição de construção é relevante para o tempo de produção. Assim, quanto maior for o número de camadas a produzir, o tempo de produção aumenta, ou seja, a construção na vertical demora sempre o mesmo tempo (17 minutos) e é sempre superior à construção na horizontal para qualquer que seja o caso de percentagem de preenchimento. Para o caso de produção na horizontal o efeito do preenchimento já é notado

claramente. Para este caso de produção horizontal, pese embora o número de camadas a processar seja menor que na produção vertical, a área a depositar na horizontal em cada camada vai variando. Inicia com uma camada depositada muito pequena, vai aumentando até meia altura da amostra e depois diminui até à produção da camada final da amostra. Assim existe uma variação da área a depositar que com a variação do preenchimento se faz notar no aumento do tempo de produção com o aumento da percentagem. Neste estudo o número de camadas produzidas na horizontal foram de 84, enquanto na vertical foram de 146. Quanto à quantidade de material a utilizar na produção, naturalmente, não varia significativamente para a mesma percentagem de preenchimento, mas aumenta com a percentagem de preenchimento. É de referir que para as diferentes posições de construção não foram utilizadas estruturas de suporte.

Pode ser observado nas figuras 6 e 7 o resultado dos ensaios de compressão para as amostras testadas na vertical e na horizontal respetivamente. Na análise das curvas é evidenciada a percentagem de preenchimento para um desempenho mecânico mais robusto, que é função da quantidade de material presente em cada amostra produzida.

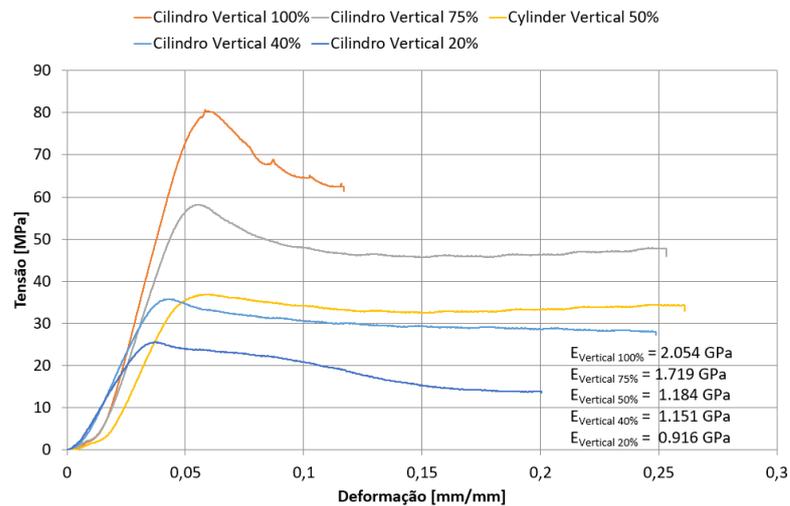


Fig. 6 | Curvas tensão deformação para os provetes ensaiados à compressão na posição vertical

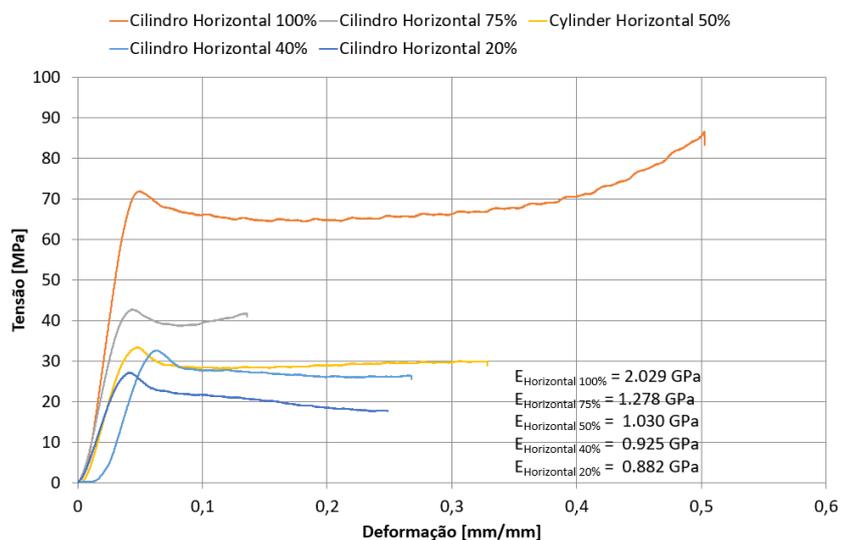


Fig. 7 | Curvas tensão deformação para os provetes ensaiados à compressão na posição horizontal

O efeito da direção da produção na vertical e horizontal também é verificada, sendo que para o caso dos componentes produzidos na vertical, em que as camadas depositadas estão na direção perpendicular à deformação provocada pelo ensaio de compressão também é evidenciada.

Na figura 8 é mostrado a tensão máxima para as amostras produzidas na vertical e na horizontal para as diferentes percentagens de preenchimento. Comparando a produção na vertical com a construção na horizontal, a tendência é de aumento da resistência à compressão com o aumento da percentagem de preenchimento, em que a produção na vertical apresenta maior valores de tensão. A exceção desta é na percentagem menor de preenchimento.

Na figura 9 é detalhado o módulo de elasticidade longitudinal à compressão, em que existe sempre um valor maior para esse módulo no caso da construção na vertical. Esse valor vai aumentando com a percentagem de preenchimento.

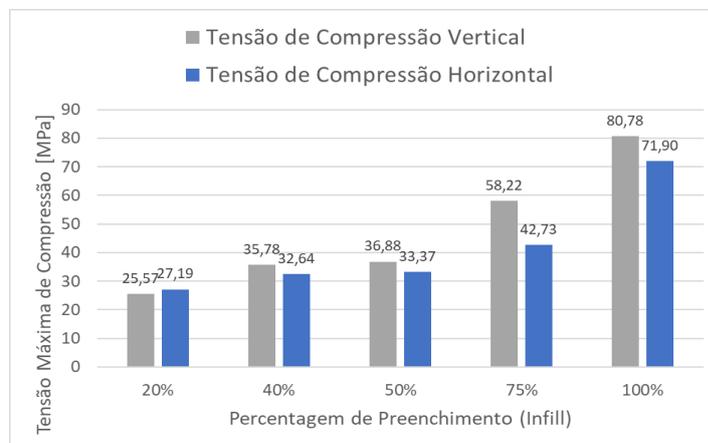


Fig. 8 | Tensão máxima de compressão para os diferentes preenchimentos em função da posição de construção

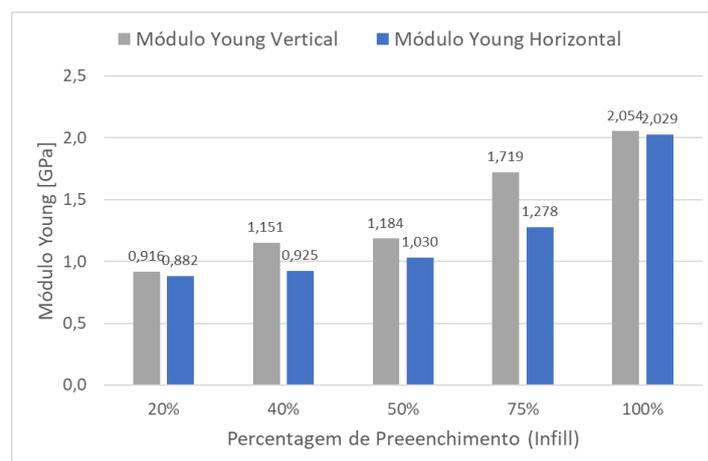


Fig. 9 | Módulo de elasticidade aparente para os diferentes preenchimentos em função da posição de construção

É possível analisar na figura 10 que as camadas são solicitadas de modo distinto conforme a posição de construção das amostras (vertical e horizontal). As camadas à compressão em que a produção da amostra estava na posição vertical favorece o comportamento mecânico, porque as camadas sobrepostas estão todas à compressão. Para o caso de menor percentagem de preenchimento (20%) a resistência mecânica é maior na construção na horizontal. Neste caso particular as camadas produzidas na direção de aplicação da deformação interagem umas com as

outras anulando a encurvadura e aumentam a resistência mecânica comparando com a construção na vertical.

Na prática industrial, a maior parte das vezes neste tipo de fabricação é utilizada uma percentagem de preenchimento de 40%, pese embora uma percentagem entre 10 e 20% pode garantir um equilíbrio entre as propriedades mecânicas dos componentes produzidos, a fiabilidade na impressão, o tempo de produção e o material consumido na produção do mesmo.

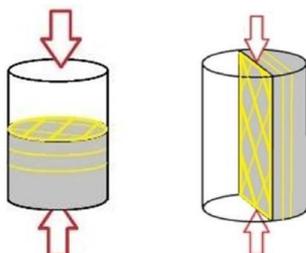


Fig. 10 | Esquema da aplicação da deformação de compressão nos provetes cilíndricos em função dos planos de construção: a) vertical b) horizontal

4- CONCLUSÕES

O estudo experimental apresentado neste trabalho visa apresentar a influência de dois parâmetros do processo, que são, a percentagem de preenchimento e a posição de construção.

As amostras produzidas na vertical apresentam comportamento à compressão com valores mais elevadas de tensões. Dado que todos os outros parâmetros se mantiveram constantes, pode-se concluir que a posição de construção (vertical vs horizontal) tem influência nas propriedades mecânicas e resistência à compressão do modelo, resultando que as amostras produzidas na posição vertical oferece uma resistência à compressão e módulo de elasticidade superiores. Para baixas densidades de preenchimento existe uma inversão na tensão máxima de compressão que resultará do efeito de encurvadura das camadas produzidas na horizontal e deste modo a interação dessas camadas resulta num aumento da resistência mecânica para essas percentagens de preenchimento.

Os resultados apresentados são um contributo para o projeto de componentes para produção por FDM com material PLA, e também para a filosofia de desenho de produtos para fabricação aditiva (DfAM).

AGRADECIMENTOS

Os trabalhos foram desenvolvidos parcialmente com os estudantes do Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta do Instituto Politécnico de Leiria. Esta investigação é patrocinada por fundos nacionais através da FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, pelo projeto UID/EMS/00285/2020 e LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

- Almeida, H. A., & Correia, M. S. (2016). Sustainable Impact Evaluation of Support Structures in the Production of Extrusion-Based Parts. In *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* (pp. 7–30). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0549-7_2.
- Beattie, N., Bock, N., Anderson, T., Edgeworth, T., Kloss, T., & Swanson, J. (2021). Effects of Build Orientation on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. In *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 30, Issue 7, pp. 5059–5065). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05624-4>.
- ERYILDIZ, M. (2021). Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation. In *European Mechanical Science* (Vol. 5, Issue 3, pp. 116–120). European Mechanical Science. <https://doi.org/10.26701/ems.881254>.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- Hodzic, D., & Pandzic, A. (2021). Influence of Infill Design on Compressive and Flexural Mechanical Properties of FDM Printed PLA Material. In *Proceedings of the 32nd International DAAAM Symposium 2021* (pp. 0191–0199). DAAAM International Vienna. <https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.029>.
- Katiyar, P. C., Singh, B. P., Chhabra, M., & Parle, D. (2022). Effect of Build Orientation on Load Capacity of 3D Printed Parts. In *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* (Vol. 10, Issue 6, pp. 38–52). Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication – BEIESP. <https://doi.org/10.35940/ijrte.f6821.0310622>.
- Lemos, I., Almeida, H. A., & Correia, M. S. (2019). Avaliação de paredes inclinadas obtidas por fabricação aditiva de extrusão / evaluation of sloping walls by extrusion based additive manufacturing. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* ISSN, 1646, 7078.
- Martins, J., Correia, M. S., Almeida, H. A., & Vasco, J. C. (2017). Análise ao comportamento mecânico de peças produzidas com estruturas de suporte por fdm / mechanical behaviour analysis of components produced with support structures by fdm. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões* ISSN, 1646, 7078.
- Pandzic, A. (2021). Influence of Layer Height, Build Orientation and Post Curing on Tensile Mechanical Properties of SLA 3D Printed Material. In *Proceedings of the 32nd International DAAAM Symposium 2021* (pp. 0200–0208). DAAAM International Vienna. <https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.030>
- Rajkumar, S. (2022). Effect of infill pattern and build orientation on mechanical properties of FDM printed parts: An experimental modal analysis approach. *arXiv preprint arXiv:2202.05692*.
- Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A., & Talamona, D. (2021). Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 10, p. 1587). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13101587>

