

AValiação DAS PROPRIEDADES DE MATERIAL PRODUZIDO POR FDM EM IMPRESSORA 3D

Raquel Meirelles Bolelli ¹; Guilherme Wolf Lebrão ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *A técnica de prototipagem tem recebido inúmeras evoluções devido à incorporação da impressora 3D nos dias atuais. O Fused Deposition Modeling (FDM) é uma das tecnologias utilizada em tal procedimento, no qual são introduzidos filamentos de diversos materiais, que são aquecidos e depositados em camadas sucessivas a fim de se produzir o modelo a ser obtido. As propriedades mecânicas em cada protótipo dependem das variações dos parâmetros da impressão, como a espessura do filamento e das camadas, a direção que os filamentos são posicionados, a estrutura interna e externa deles, entre outros fatores. A metodologia utilizada se baseia na conciliação de um procedimento computacional seguido de experimentos, através dos quais é possível determinar uma combinação profícua de parâmetros de fabricação dos materiais e parâmetros propiciados pela impressora. Este projeto de iniciação científica tem como propósito avaliar como cada material impresso apresenta características diferentes para os ensaios de tração, flexão e impacto e qual seria o substrato mais resistente para cada uma dessas situações.*

Introdução

O processo da impressão 3D, apesar de ter sido incorporado desde a década de 1980 (ASSIS, 2018), ganhou muito mais relevância nos últimos anos. Tal tecnologia tem sido inserida em diferentes áreas do cotidiano como: na biomedicina para a fabricação de próteses para o corpo humano; na engenharia civil para a construção de casas, pontes e condomínios; na área da ciência para produzir diversos eletrônicos e até mesmo no setor alimentício. Uma das tecnologias utilizadas no recurso da impressão 3D é o *Fused Deposition Modeling* (FDM), no qual o material vem na forma de um filamento sólido que será fundido posteriormente.

Na utilização desse método, deve-se levar em consideração a existência de diferentes parâmetros iniciais que devem ser determinados, uma vez que eles são responsáveis por caracterizar as propriedades mecânicas do protótipo em sua fase final. Dados como cargas adicionadas aos filamentos, padrão de impressão, força da cabeça de extrusão, orientação dos filamentos na amostra e até mesmo sua cor são exemplos desses parâmetros que podem ser alterados, e essencialmente a variação do material do filamento deve ser considerada.

O FDM foi responsável pela prosperidade no processo de prototipagem, devido à sua diferenciada velocidade de produção que é oferecida, revolucionando assim, a fabricação e estudos sobre componentes compostos constituídos de polímeros (LIU, LEI E XING, 2019).

Material e Métodos

O projeto foi dividido e estudado minuciosamente em duas etapas: a etapa prévia e a etapa posterior à impressão. Em relação à primeira fase, os protótipos foram modelados computacionalmente de acordo com os ensaios determinados por norma. Para cada material, foram selecionados os mesmos parâmetros iniciais, como a geometria interna do modelo, densidade do preenchimento, orientação no processo de deposição dos filamentos e velocidade de produção, variando apenas suas respectivas temperaturas de impressão - uma vez que estas dependem do ponto de fusão de cada um.

Após a impressão 3D dos protótipos, foi realizada a segunda etapa, que consistiu em submeter os corpos de prova aos ensaios mecânicos. Consequentemente, foi possível determinar as propriedades de cada um, comparando os resultados das amostras para concluir quais as melhores combinações de parâmetros iniciais e materiais quanto à resistência de um modelo impresso na impressora 3D.

Foi utilizado o software CAD 3D *SpaceClaim* para o modelamento geométrico dos protótipos impressos de acordo com as normas ASTM D790, ASTM D638 e ASTM D256. As Figuras 1, 2 e 3 mostram os modelos usados para os corpos de prova para os ensaios de flexão, tração e impacto, respectivamente.

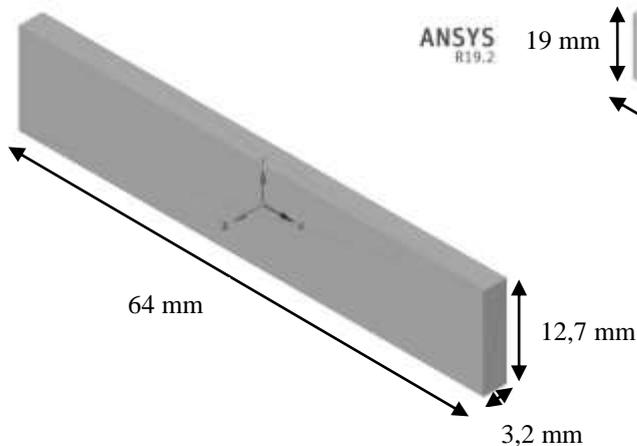


Figura 1 – Modelo de corpo de prova para ensaio de flexão (Fonte: Autora)

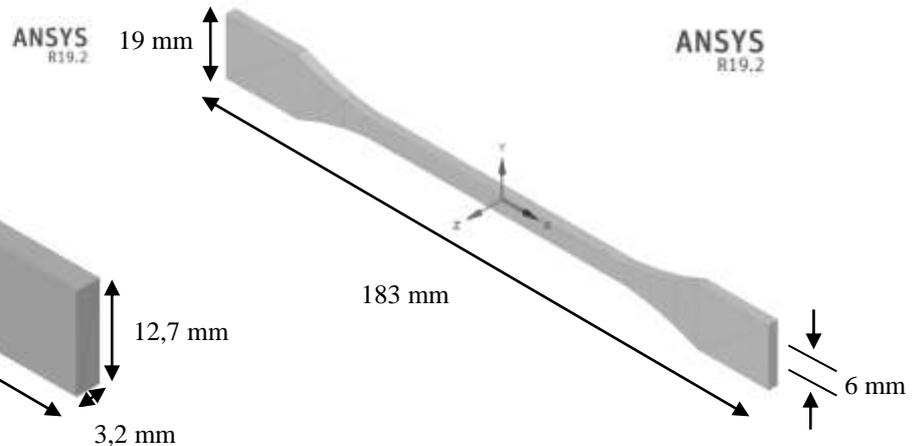


Figura 2 – Modelo de corpo de prova para ensaio de tração (Fonte: Autora)

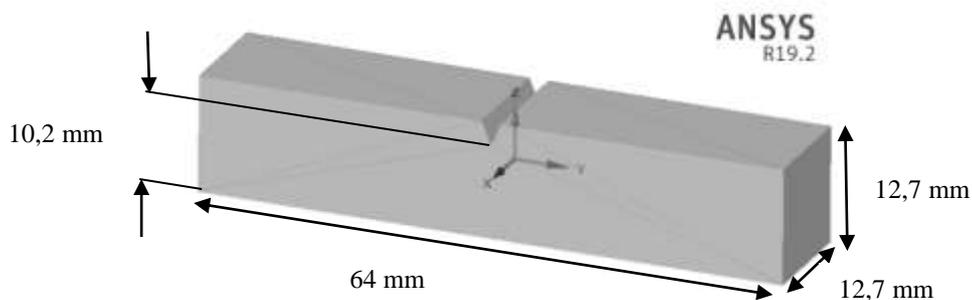


Figura 3 – Modelo de corpo de prova para ensaio de impacto (Fonte: Autora)

Posteriormente, a determinação e inserção dos parâmetros iniciais na impressora 3D foram feitos com o auxílio do *Simplify3D Software*. Os parâmetros comuns definidos para todos os materiais são apresentados na Tabela 1. Ainda, a Figura 4 ilustra o formato de preenchimento interno escolhido como foco nessa pesquisa que, dentre as opções existentes, foi o triangular.

Tabela 1 – Parâmetros para impressão 3D dos corpos de prova

Formato do preenchimento interno	Triangular
Velocidade de impressão	35 mm/s
Largura da extrusão	0,4 mm
Densidade de preenchimento	50%
Quantidade de camadas sólidas nas paredes laterais	3
Quantidade de camadas sólidas superiores	2
Quantidade de camadas sólidas inferiores	2
Espessura de cada camada	0,2 mm
Orientação da deposição dos filamentos	0°
Diâmetro dos filamentos	1,75 mm

Fonte: Autora

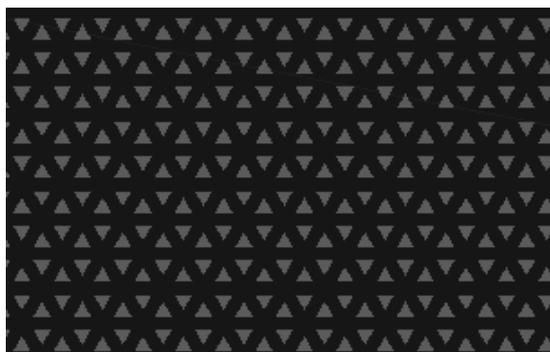


Figura 4 – Estrutura interna dos corpos de prova (Fonte: Autora)

Em relação à escolha dos materiais, os ensaios realizados foram com os filamentos de PETG, ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) condutivo, PLA (Poliácido Láctico) com fibra de carbono, PLA com cobre, PLA com bronze e PLA com alumínio, TPU (Poliuretano Termoplástico), PLA branco, preto e cinza e ABS branco, preto e cinza.

As temperaturas de impressão foram determinadas especificamente para cada material, como indica a Tabela 2:

Tabela 2 – Temperaturas de impressão relativas a cada material

Materiais	Temperatura de impressão
PLA com cobre	217 °C
PLA com alumínio	217 °C
PLA com bronze	217 °C
PLA com fibra de carbono	217 °C
ABS condutivo	235 °C
PETG	260 °C
PLA (branco, preto e cinza)	217 °C
ABS (branco, preto e cinza)	217°C
TPU	240°C

Fonte: Autora

Em seguida, foram impressos três corpos de prova relativos a cada ensaio para cada material que foi impresso. Por fim, os ensaios mecânicos para flexão, tração e impacto foram feitos, respectivamente, conforme as normas ASTM D790, ASTM D638 e ASTM D256. A Figura 5 retrata os corpos de prova após a impressão:

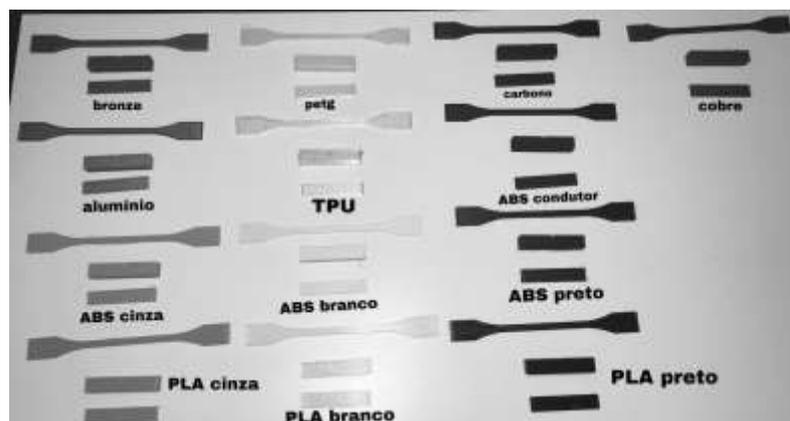


Figura 5 – Foto dos corpos de prova após a impressão (Fonte: Autora)

Resultados e Discussão

As médias dos resultados encontrados para cada material em relação a cada ensaio mecânico podem ser visualizados nas Tabelas 3, 4 e 5:

Tabela 3 – Resultados dos ensaios para o ensaio de flexão

Material	Tensões médias de flexão (MPa)
PLA com cobre	59,23
PLA com alumínio	53,73
PLA com bronze	62,75
PLA com fibra de carbono	52,47
ABS condutivo	28,57
PETG	52,70
PLA branco	68,46
PLA preto	62,97
PLA cinza	73,42
ABS branco	42,63
ABS preto	34,12
ABS cinza	47,91

Fonte: Autora

Tabela 4 – Resultados dos ensaios para o ensaio de tração

Material	Tensões médias de tração (MPa)
PLA com cobre	35,09
PLA com alumínio	43,72
PLA com bronze	33,49
PLA com fibra de carbono	27,23
ABS condutivo	16,42
PETG	21,01
PLA branco	68,78
PLA preto	62,10
PLA cinza	62,14
ABS branco	41,00
ABS preto	33,23
ABS cinza	49,72
TPU	26,20

Fonte: Autora

Tabela 5 – Resultados dos ensaios para o ensaio de impacto

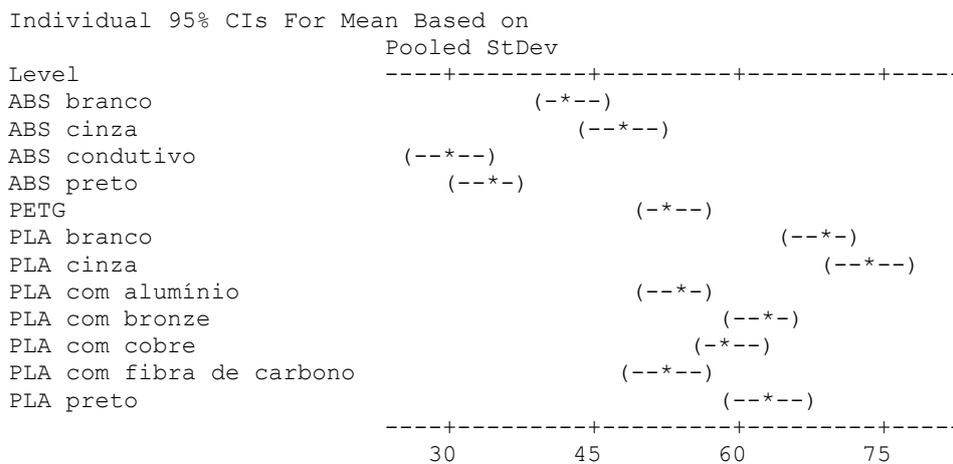
Material	Energias Médias de Impacto (J/m)
PLA com cobre	32,10
PLA com alumínio	25,79
PLA com bronze	26,93
PLA com fibra de carbono	34,06
ABS condutivo	70,49
PETG	25,81

Fonte: Autora

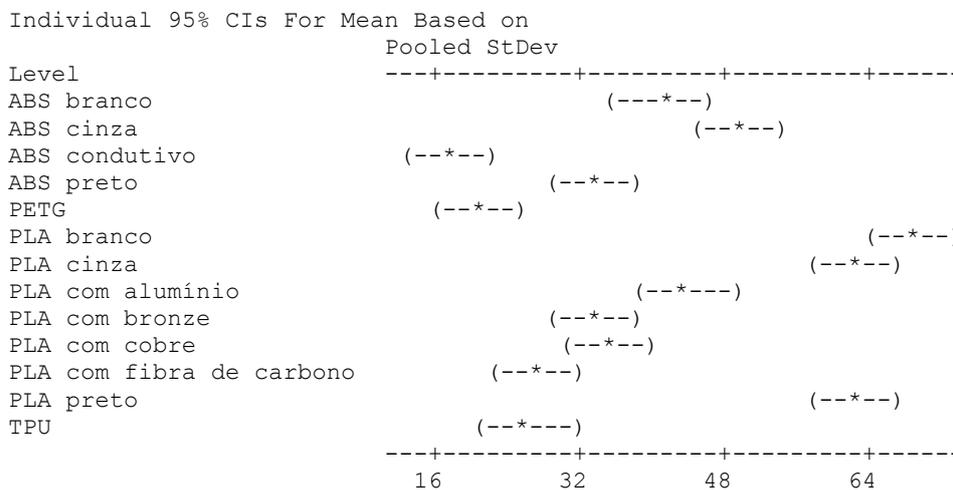
Esses valores são produtos de ensaios mecânicos para pequenas proporções de corpos de prova produzidos. Sendo assim, foi aplicado o método estatístico ANOVA para determinar se há algum material de filamento que seria o mais vantajoso quando produzido em grandes quantidades.

Os resultados a seguir foram obtidos através do software *Minitab*, no qual foram inseridos os resultados obtidos para cada ensaio e assim são gerados diagramas que apresentam um intervalo de média para grandes proporções de material com 95% de confiança. Se houver intersecção entre tais intervalos, significa que eles possuem mesma média da população. Caso contrário, é possível ver qual deles apresenta maior valor.

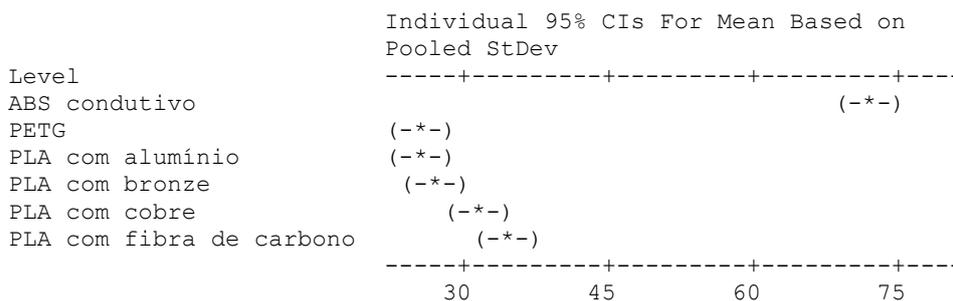
Comparação dos resultados do ensaio à flexão:



Comparação dos resultados do ensaio à tração:



Comparação dos resultados ensaio de impacto:

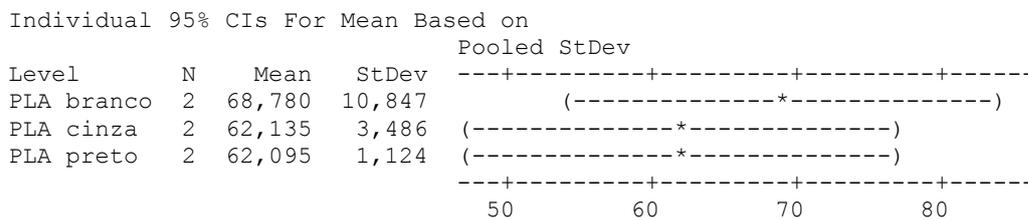


Para o caso de flexão, os componentes que obtiveram as maiores resistências foram os filamentos de PLA branco e PLA cinza. Como houve intersecção entre os seus intervalos, é considerado que eles apresentam a mesma média para sua população. Já para o ensaio de tração, os resultados mais vantajosos foram em relação aos filamentos de PLA branco, PLA preto e PLA cinza, por apresentaram os maiores valores de resistência. Por fim, concluiu-se que para o experimento de impacto, o material com maior resistência seria o ABS condutivo, uma vez que quanto menor for a energia absorvida no processo, mais frágil será o comportamento do material àquela sollicitação dinâmica estabelecida, e este filamento apresentou os valores mais altos para a energia de impacto envolvida no ensaio mecânico.

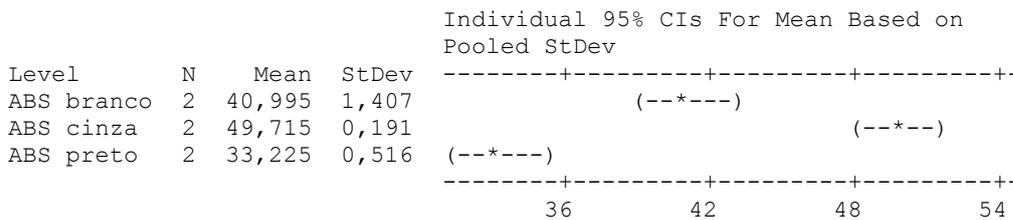
Deve ser ressaltado que o corpo de prova produzido com filamento de TPU é muito flexível e não produzirá fratura sob flexão, por conseguinte a própria norma de flexão para polímeros (ASTM D790) recomenda que tal material seja testado apenas sob tração (ASTM D638).

Outra análise feita neste projeto foi a interferência da cor nos filamentos de PLA e ABS comuns para os ensaios de tração e flexão. Para cada um desses materiais, variaram-se os filamentos entre as cores branca, preta e cinza e através do método estatístico ANOVA, foi analisado se realmente existe uma diferença entre as médias de população com 95% de confiança:

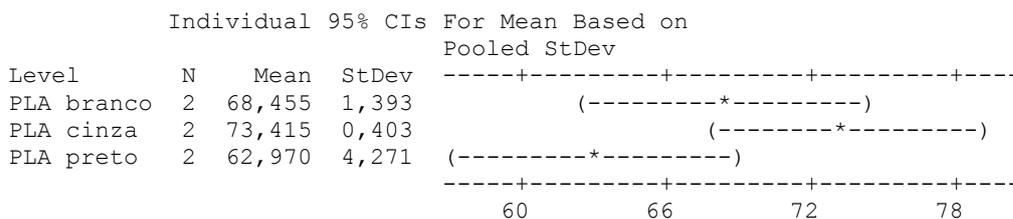
Comparação dos resultados ensaio de tração para o PLA:



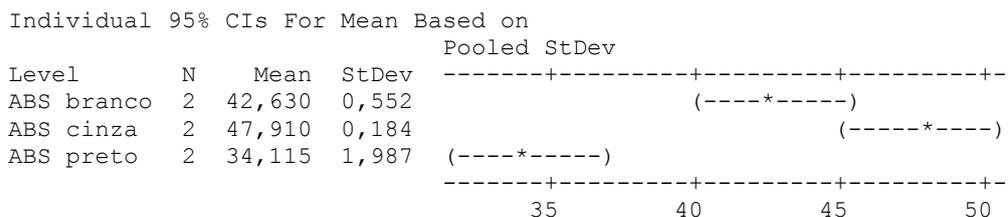
Comparação dos resultados ensaio de tração para o ABS:



Comparação dos resultados ensaio de flexão para o PLA:



Comparação dos resultados ensaio de flexão para o ABS:



É possível observar que tanto para o ensaio de tração, como na flexão para o filamento de PLA, houve intersecção entre todos os intervalos fornecidos. Logo conclui-se que não há diferença entre as médias de suas populações relativas a cada ensaio realizado, e por conseguinte, não há interferência da cor em seu comportamento mecânico.

Já para o filamento de ABS, no ensaio de tração, não há intersecção entre seus valores, portanto, cada cor de filamento apresenta um comportamento diferente. No ensaio de flexão, posteriormente, é visível uma intersecção entre os intervalos do ABS branco e do ABS cinza, logo eles apresentam mesma média e mesmo comportamento relativo à flexão, diferentemente do ABS preto que apresenta uma média inferior.

Conforme foi apresentado, foram impressos 3 corpos de prova de cada material referente a cada ensaio mecânico realizado, logo foi possível observar algumas dissemelhanças nos valores obtidos experimentalmente. Entretanto, ainda foi possível obter resultados conclusivos sobre quais materiais apresentaram melhor comportamento e resistência, dentre os treze selecionados, de acordo com os experimentos executados para este projeto.

Os resultados encontrados até então são moderadamente satisfatórios, entretanto tais divergências podem estar relacionadas a erros aleatórios de medição e imprecisão na leitura dos equipamentos, aproximação dos valores e sua consequente propagação, interferências do meio, falhas no processo de impressão e até mesmo irregularidades no filamento do material.

Conclusões

Essa pesquisa se insere em uma área de conhecimento que possibilita produzir componentes (protótipos, modelos, peças reais, etc.) físicos em 3 dimensões (3D), com informações obtidas diretamente de modelos geométricos, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível. (BRANCO E MARTINS, 2017). Desta maneira, foram estudadas as combinações preferíveis de parâmetros iniciais e materiais quanto à resistência dos protótipos impressos para este projeto, visando colaborar para o estudo científico sobre impressão 3D e viabilizar a produção de componentes constituídos por esses elementos em FDM.

Os filamentos de PLA branco e cinza geraram melhores resultados para peças modeladas no caso dos ensaios de flexão, e os mesmos materiais juntamente do PLA preto foram os mais vantajosos para tração. Por fim, para o ensaio de impacto há preeminência no filamento de ABS condutivo. Tais materiais, devido ao fato de que obtiveram os maiores

valores em relação as tensões e à energia - em relação ao ensaio de impacto – são os mais resistentes.

Juntamente, também foi feita a análise da interferência da cor nos filamentos comuns de PLA e ABS nos ensaios de flexão e tração e conclui-se que: para o filamento de PLA, tanto no ensaio de tração como na flexão, não há interferência da cor do material e seu comportamento mecânico pode ser considerado unânime. Já para o filamento de ABS há interferência da cor para ambos os ensaios, exceto que para o ensaio de flexão, o ABS branco e o ABS cinza reproduzem mesma média, e portanto, pode-se considerar que manifestam mesmo comportamento mecânico somente para este ensaio.

Observou-se também, que as rupturas se deram em pluralidade nas junções entre falhas, uma vez que a orientação da deposição dos filamentos foi de 0°. Isso indica que há a necessidade de otimização do desempenho estrutural baseado na direção das camadas de impressão, em relação à geometria do modelo (MARTINEZ *et al.*, 2019), sendo preferível que tal deposição seja perpendicular à seção transversal dos protótipos.

Além disso, foi concluído que as cargas metálicas ou de carbono adicionadas aos filamentos não melhoram suas propriedades mecânicas, pelo contrário diminuem a resistência dos materiais, provavelmente devido à má adesão das cargas aos filamentos.

Referências Bibliográficas

- ASSIS, M. A. P. IMPRESSÃO 3D, MODELOS DE NEGÓCIOS E OS NOVOS CENÁRIOS PARA A PROPRIEDADE INTELECTUAL. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- ASTM D 256-4. Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. USA, 2008.
- ASTM D638-03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. USA, 2003.
- ASTM D790. Standard Test Methods: Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. USA, 2001.
- BRANCO, R. R. C.; MARTINS, K. Y. N. ELABORAÇÃO DE PROTOCOLO DE ENSAIOS MECÂNICOS PARA AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO MATERIAL PLA ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA POR MEIO DO PROCESSO FDM. In: II CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 2017, Campina Grande. Anais.
- LIU, Z.; LEI, Q.; XING, S. MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WOOD, CERAMIC, METAL AND CARBON FIBER-BASED PLA COMPOSITES FABRICATED BY FDM. *Journal Of Materials Research And Technology*, [s.l.], jul. 2019. Elsevier BV.
- MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L.; SANTOS, D. M.; PEDROTI, L. G.; CARLO, J. C.; MARTINS, M. A. D. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.14, n.1, p.125-141, set.2019.