

REDUÇÃO DO TEMPO DE IMPRESSÃO 3D PARA AMOSTRAS DE PLA EM FUNÇÃO DA LARGURA E ORIENTAÇÃO DE LINHAS DE IMPRESSÃO

Ricieri Neidert, rici.neidert@gmail.com¹

Nicholas Mark Chimielewski Wachterski, nicholaswachterski@gmail.com¹

Diogo Berta Pitz, diogo.pitz@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81530-000

Resumo. Amostras fabricadas em uma impressora 3D comercial de baixo custo, a Anycubic Mega S, foram utilizadas para comparar combinações de parâmetros de impressão 3D. Foram escolhidos parâmetros com influência no tempo total de fabricação e os impactos em resistência mecânica da peça final. As variáveis testadas foram a largura de linha de extrusão e orientação da varredura de impressão em relação ao esforço de tração na amostra. Três amostras de cada combinação foram testadas. Diminuições de até 50% no tempo de impressão foram obtidas com larguras de linha maiores, porém com sacrifício da continuidade de material nas amostras e por consequência diminuindo a resistência das mesmas.

Palavras chave: Impressão 3D. Parâmetros de impressão. Largura de linha. PLA. Otimização de tempo

1. INTRODUÇÃO

Manufatura aditiva ou o termo mais popular: impressão 3D, é o processo de fabricação de uma peça a partir da deposição de um determinado material, sendo esse em camadas sobrepostas repetidas diversas vezes até que se obtenha o objeto completo. O primeiro passo para preparação de uma impressão 3D acontece dentro do software dedicado a impressões 3D e é chamado “fatiamento”. Nessa etapa o software divide verticalmente o modelo 3D obtendo curvas de níveis em geral planas da base até o topo da peça. A partir disso, baseado em diversos parâmetros configuráveis o software gera um código para comandar a impressora, conhecido como código G. Assim como outras máquinas CNC (comando numérico computadorizado), o código G ordena os comandos de movimentação e extrusão através de 3 eixos em um espaço cartesiano (Takagaki, 2012).

As tecnologias de impressão vêm crescendo e têm sido bastante difundidas mundialmente, tanto industrialmente quanto para usos pessoais. Segundo o relatório da IFI CLAIMS Patent Services, sobre dez tecnologias que cresceram nos últimos 10 anos, a impressão 3D cresceu 40% entre os anos de 2014 e 2019 (Ifi Claims Patent Services, 2020).

Seja para uso pessoal ou comercial as impressões 3D são bastante limitadas pela questão dos tempos de impressão. À medida que o volume de material necessário para imprimir a peça cresce, o tempo necessário torna-se bastante elevado, facilmente chegando a dezenas de horas. O que limita a utilização das impressoras 3D como meio direto de produção, ficando geralmente restritas a protótipos ou tiragens muito baixas do produto. Atualmente, a impressão 3D é vastamente difundida e consolidada como ferramenta para fabricação de protótipos na indústria. (Hopkinson e Dickens, 2001).

Existem diversos modelos de impressoras dedicadas a uso pessoal com custos de R\$1500 a R\$3000, dentre elas o modelo utilizado para produção das amostras deste estudo, a Anycubic MegaS (Figura 1).

O foco deste trabalho é otimizar o tempo de impressão de uma impressora 3D comercial, estudando os parâmetros do processo de extrusão, quais os seus impactos sobre o tempo de impressão, bem como a sua relação com as propriedades mecânicas da peça impressa. Dentre as variáveis, as que possuem um alto impacto sobre o tempo de impressão são a altura das camadas impressas e a velocidade de deslocamento da extrusora. Essas variáveis têm em suas limitações o diâmetro do bico da extrusora e a capacidade dos eixos da máquina, respectivamente. Desta maneira foram selecionadas outras variáveis não tão estudadas e observadas até o momento, sendo elas a largura de linha e o ângulo fixo de impressão das camadas em relação à carga aplicada (no caso das amostras para o ensaio de tração).

A maior contribuição para a redução do tempo de impressão vem da variável largura de linha. Quanto maior esta largura, menos linhas de impressão são necessárias para preencher uma mesma área (Figura 2). Logo, o percurso final da extrusora é menor e, portanto, o tempo para fabricar a peça também é menor. As orientações de camada servem como referência para observação da anisotropia que resulta da interação entre as linhas de impressão.



Figura 1. Impressora 3D Anycubic MegaS Fonte: (Anycubic, 2020)

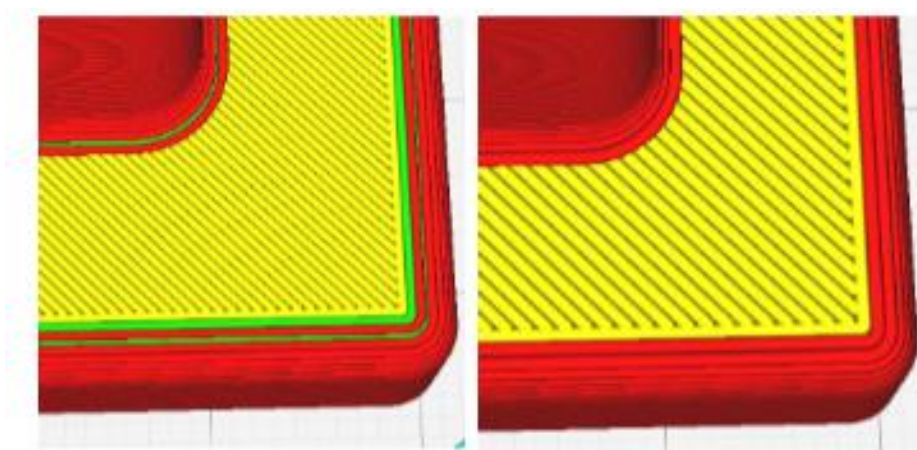


Figura 2. Diferença entre as larguras de linhas de impressão. 0,4 mm (esq.) e 0,8 mm (dir.).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Material de impressão

O material do filamento de impressão é o ácido poli lático (PLA) com 1,75 mm de diâmetro. O PLA pode ser amorfo, semicristalino ou altamente cristalino, sendo um material da família do poliéster e biodegradável, feito a partir do milho ou cana-de-açúcar. É amplamente utilizado em embalagens comerciais biodegradáveis. Com boa processabilidade termoplástica, é matéria prima comum e amplamente utilizada na prototipagem rápida com impressoras 3D; como vantagem pode-se destacar a facilidade de impressão, seu apelo ecológico, bem como a possibilidade de imprimir sem a necessidade da mesa aquecida. Como possui uma temperatura de fusão sensivelmente menor, o PLA de alta qualidade é um dos materiais mais fáceis de imprimir pois adere facilmente a uma ampla variedade de superfícies (Brito et al., 2011).

O PLA possui uma resistência à tração de aproximadamente 50 a 70 MPa e o módulo de elasticidade entre 3,0 e 4,0 GPa. Essa variação se dá pela composição variada do PLA, que costuma ter diversas cadeias de polímeros, bem como aditivos que variam a sua composição final, dependendo da massa molar e da composição estereoquímica. As deficiências do PLA são a fragilidade inerente, um limitado alongamento até a ruptura, e uma baixa resistência ao impacto (Santana et al., 2018).

O PLA é um filamento com menor temperatura de impressão que outros materiais derivados de petróleo. Sua temperatura de transição vítrea é entre 55 e 65 °C e pontos de fusão que variam de 170 a 180 °C. O polímero pode ser resistente ao calor até temperaturas de 110 °C. Em geral, as configurações do filamento de Ø1,75 mm do PLA têm uma faixa ideal de temperatura de impressão de cerca de 180 a 210 °C. (Santana et al., 2018).

2.2. Procedimentos experimentais

Testes de resistência à tração foram aplicados às amostras fabricadas por impressão 3D. Todas as amostras foram impressas em uma impressora 3D modelo Anycubic MegaS com extrusora de 0,4 mm a partir do mesmo rolo de filamento PLA de 1kg. No software utilizado para gerar o código G da impressão foram customizados alguns parâmetros de modo a obter todas as camadas com 100% de preenchimento e a mesma orientação em todas. Normalmente as camadas consecutivas são ortogonais. Para obter as diferentes orientações desejadas, o layout de impressão sobre a mesa ficou conforme a Figura 3.

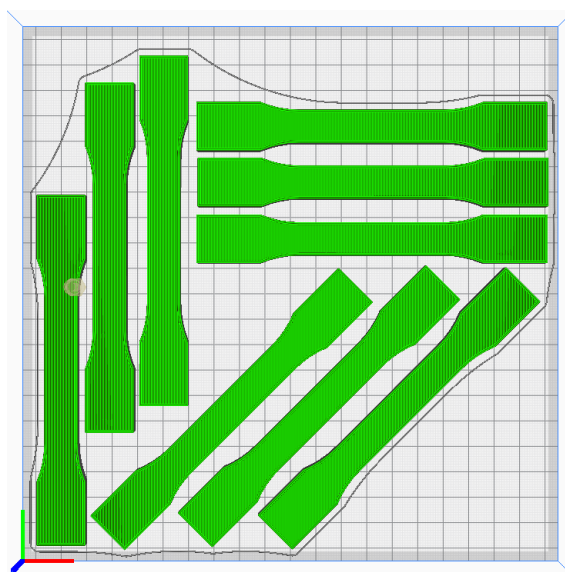


Figura 3. Layout na mesa de impressão

Todas as amostras possuem duas “cascas” no perímetro e o preenchimento de 100%. As larguras de linha aplicadas foram 0,4 mm (padrão), 0,6 mm e 0,8 mm, como mostra a Figura 4.

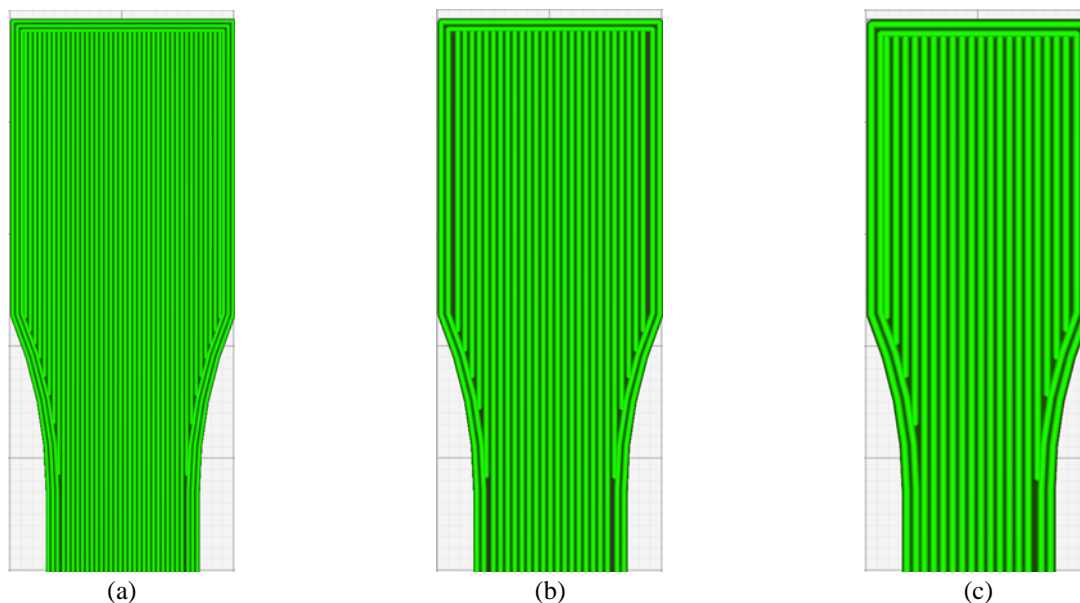


Figura 4. Larguras de linha aplicadas às amostras 0,4 mm (a), 0,6 mm(b) e 0,8 mm (c)

As orientações de 0°, 45° e 90° têm como referência a orientação do esforço de tração. Nesse caso 0° significa que as linhas de impressão estão na mesma direção que a carga. Isto pode ser melhor compreendido observando a Figura 5.

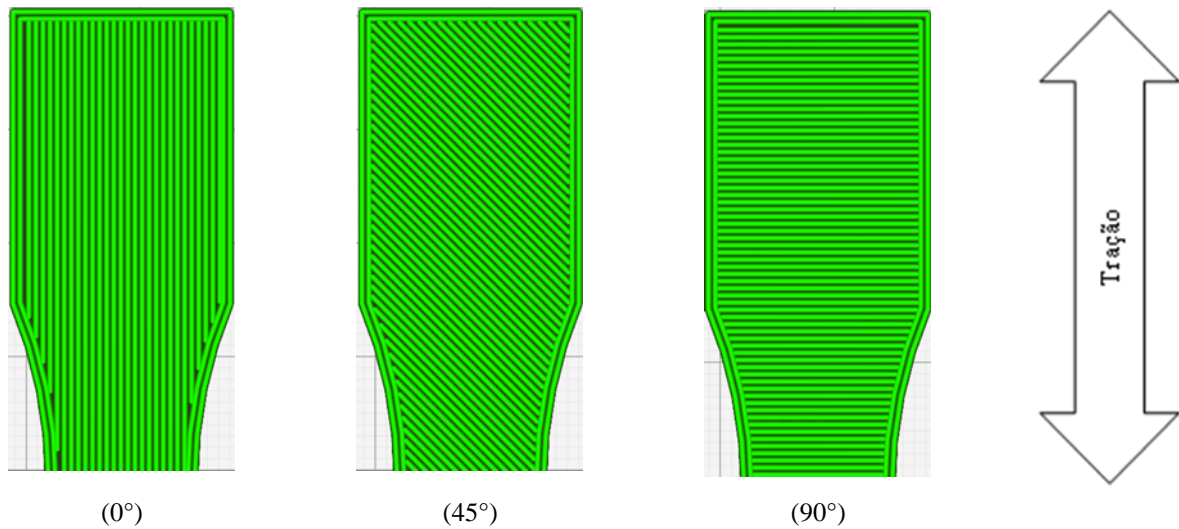


Figura 5. Orientação das linhas de impressão

As amostras foram desenhadas de acordo com o padrão ASTM D638, seguindo a geometria apresentada na Figura 6.

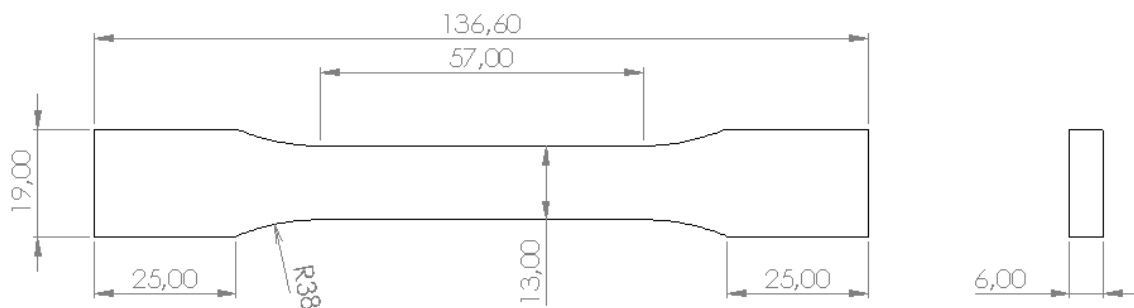


Figura 6. Dimensões do corpo de prova ASTM

Para minimizar os efeitos de outros parâmetros além dos de interesse sobre os resultados, alguns parâmetros principais foram fixados e mantidos durante todas as impressões. São mostrados os principais na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de impressão fixados

Altura de camada	0,3 mm
Perímetros	2
Preenchimento	100%
Tipo de preenchimento	Raster
Temperatura de extrusão	210°C
Temperatura da mesa	60°C

Os tempos de fabricação em função das combinações de parâmetros estão apresentados a seguir, na Tabela 2. Como esperado houve grande redução no tempo de impressão ao passar de 0,4 mm (padrão) para 0,6 e 0,8 mm. Por ser um fator geométrico na constituição das camadas a redução de tempo torna-se inversamente proporcional ao valor da largura de linha. De acordo com os valores encontrados pode-se dizer que ao dobrar a largura de linha, o tempo é reduzido em 50 %. É uma redução muito expressiva, visto que os tempos de impressão podem chegar facilmente a dezenas de horas.

Tabela 2. Tempos de fabricação dos corpos de prova

Largura de linha (mm)	Ângulo do preenchimento	Tempo de impressão	Massa da amostra
0,4	0°	59 min	~16g
0,4	45°	60 min	~16g
0,4	90°	60 min	~16g
0,6	0°	41 min	~16g
0,6	45°	42 min	~16g
0,6	90°	42 min	~16g
0,8	0°	30 min	~16g
0,8	45°	31 min	~16g
0,8	90°	31 min	~16g

Para os ensaios de tração, cada amostra foi medida individualmente (largura e espessura). O menor valor de seção foi considerado para o cálculo dos valores de tensão. Os ensaios foram conduzidos em máquina de tração modelo EMIC10000 equipada com célula de carga de 20kN à velocidade de 5 mm/min conforme ASTM D638 de 2014. Os testes foram executados em temperatura ambiente, aproximadamente 20°C. Os resultados brutos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Medições obtidas a partir de ensaios de tração

Largura de linha [mm]	Orientação da impressão [graus]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Alongamento na ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
0,4	0	13,11	6,01	8,68	29,73	4,82	1279,49
0,4	0	12,94	6,04	11,82	27,79	3,86	1232,57
0,4	0	13,02	5,99	10,03	29,67	4,26	1241,22
0,4	45	13,22	5,79	18,08	31,20	4,63	988,25
0,4	45	13,06	5,85	11,74	34,14	11,58	1095,66
0,4	45	13,09	5,87	11,30	34,59	10,29	1140,51
0,4	90	12,89	5,99	11,14	26,82	4,47	1156,89
0,4	90	13,06	5,91	10,48	26,97	5,53	1158,43
0,4	90	13,07	5,96	9,77	27,75	6,55	1161,91
0,6	0	12,88	6,05	10,00	29,85	5,01	968,6
0,6	0	12,91	6,02	10,37	30,50	4,89	1342,39
0,6	0	12,86	6,00	7,92	36,21	6,99	1035,28
0,6	45	13,00	5,79	8,23	15,01	2,58	1078,60
0,6	45	13,00	5,87	7,14	14,70	2,52	1169,58
0,6	45	13,00	5,85	8,05	15,84	2,65	1163,02
0,6	90	12,88	5,97	7,91	10,84	1,53	1063,93
0,6	90	12,86	5,96	8,26	12,20	1,88	1069,12
0,6	90	12,87	5,91	8,45	12,48	1,74	1136,98
0,8	0	12,82	6,05	9,45	29,29	5,60	1259,86
0,8	0	12,92	6,04	6,64	25,70	4,71	1149,05
0,8	0	12,91	6,01	9,29	22,91	3,81	1285,37
0,8	45	12,98	5,87	6,61	16,01	5,20	871,65
0,8	45	12,96	5,89	7,17	17,25	4,64	842,73
0,8	45	12,98	5,86	8,00	16,91	4,65	756,54
0,8	90	12,86	6,00	5,74	9,55	2,59	625,99
0,8	90	12,90	5,98	5,71	11,62	3,21	772,30
0,8	90	12,95	6,01	5,86	9,45	2,62	712,51

Tabela 4. Análise dos dados do ensaio de tração, Dp - desvio padrão

Largura de linha [mm]	Orientação da impressão [graus]	Tensão de escoamento		Tensão de ruptura		Alongamento na ruptura		Módulo de elasticidade	
		Média [MPa]	Dp [MPa]	Média [MPa]	Dp [MPa]	Média [%]	Dp [MPa]	Média [GPa]	Dp [MPa]
0,4	0	10,18	1,58	29,06	1,10	4,31	0,48	1251,09	24,97
0,4	45	13,71	3,79	33,31	1,84	8,83	3,70	1074,81	78,24
0,4	90	10,46	0,69	27,18	0,50	5,52	1,04	1159,08	2,57
0,6	0	9,43	1,32	32,19	3,50	5,63	1,18	1115,42	199,37
0,6	45	7,81	0,58	15,18	0,59	2,58	0,07	1137,07	50,74
0,6	90	8,21	0,27	11,84	0,88	1,72	0,18	1090,01	40,76
0,8	0	8,46	1,58	25,97	3,20	4,71	0,90	1231,43	72,47
0,8	45	7,26	0,70	16,72	0,64	4,83	0,32	823,64	59,88
0,8	90	5,77	0,08	10,21	1,23	2,81	0,35	703,60	73,56

Na Tab. 4, é observada a redução gradativa dos valores médios da tensão de escoamento conforme a largura de linha aumenta. Através de análise visual das amostras com linhas mais largas parece haver um maior número de espaços vazios na seção transversal. Logo, a área efetiva de material sendo tracionada é menor do que os valores medidos no perímetro da peça. O mesmo conceito pode ser usado para explicar também o abaixamento da tensão de ruptura pois menos material está sendo efetivamente tracionado. Os espaços vazios podem ser observados na Figura 7 na amostra com linhas de 0,8 mm.

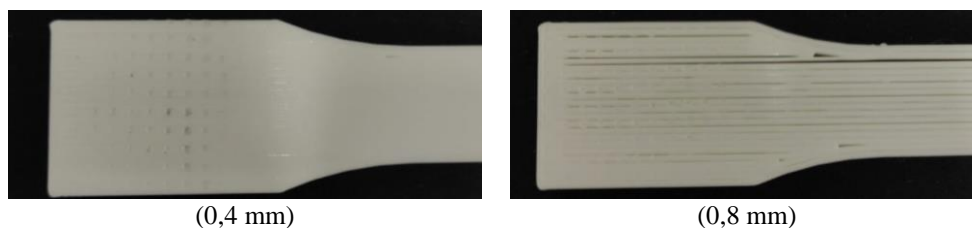


Figura 7. Descontinuidades nos corpos de prova

Há ainda o efeito das interações laterais das linhas de impressão, sendo estes mais evidenciados nos testes de corpos de prova de 45° e 90°. Os menores valores de resistência à ruptura estão em amostras com baixo valor de alongamento, o que indica que o rompimento final aconteceu assim que o perímetro da peça se rompeu seguido por uma simples separação lateral de linhas mal aderidas. Este modo de falha fica bastante claro analisando a amostra da Figura 8 (h).

A ausência de interação lateral nas amostras com linhas de 0,6 mm e 0,8 mm possibilitou o efeito visualizado na amostra da Figura 8 com linha de 0,6 mm e 0°. A ruptura ocorreu em diversas seções parciais em diferentes posições, o que não aconteceria em um material contínuo. Já na amostra com linha de 0,8 mm e 90° o rompimento foi incompleto, ficando as duas partes unidas pelo perímetro da amostra.

Os maiores valores de resistência são das amostras com linhas orientadas a 0° pois em teoria, como o esforço de tração ocorre ao longo das linhas, a interação lateral entre elas não afeta o resultado final.

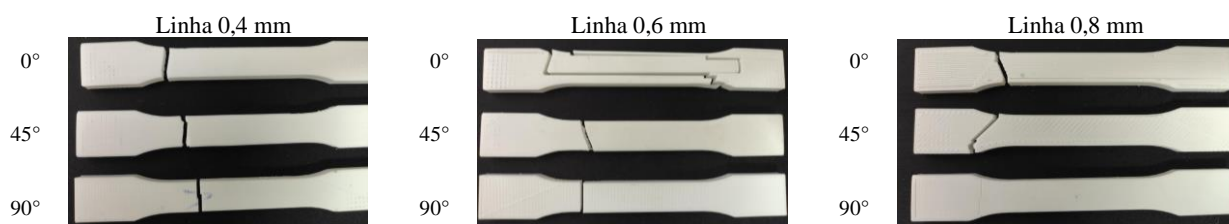


Figura 8. Fraturas dos corpos de prova em função dos parâmetros de impressão

3. CONCLUSÕES

Amostras de PLA com as diversas combinações de parâmetros foram testadas. As amostras com a largura de linha padrão de 0,4 mm produziram os maiores valores de resistência à tração, porém com os maiores tempos de fabricação. Com 0,8 mm na largura de linha foi possível a impressão da mesma peça em metade do tempo (comparada com largura de 0,4 mm) porém com uma diminuição significativa da resistência mecânica. A diminuição aconteceu devido aos vazios na seção transversal da amostra e ausência de interação lateral entre as linhas de extrusão.

Na prática, a situação proposta, de todas as linhas de todas as camadas sendo impressas na mesma direção, não ocorre. Toda camada consecutiva é normalmente impressa de forma ortogonal à anterior, o que elimina os efeitos de interação lateral das linhas de extrusão.

Constatou-se grande influência dos perímetros (cascas) sobre a resistência mecânica das amostras. Mesmo a amostra com menor resistência (0,8 mm / 90°), onde não havia nenhuma interação entre as linhas lateralmente (visto o aspecto da fratura), os dois perímetros foram capazes de resistir até 1/3 do valor da amostra mais resistente. O número de perímetros é um parâmetro a ser avaliado em estudos futuros.

Considera-se, portanto, o parâmetro largura de linha um meio eficaz para reduzir tempos de impressão. Obviamente, vista a redução de propriedade mecânica e aspecto, é necessário analisar cada caso.

4. AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. João Morais da Silva Neto e Dr. Sérgio Luiz Henke pela ajuda e acompanhamento na execução dos testes de laboratório.

Ao professor Dr. Diogo Berta Pitz pela orientação e cooperação na execução e redação do trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- Anycubic 3D Printing - *Anycubic i3 Mega S*, 13 setembro 2020. <<https://www.anycubic.com>>.
- ASTM D638-14, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, <www.astm.org>.
- Brito, G. F., et al. "Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes." *Revista eletrônica de materiais e Processos* 6.2 (2011): 127-139.
- IFI Claims Patent Services – “*Ten Fast Growing Technologies*”, 13 setembro 2020. <<https://www.ificlaims.com/2019-tech-slideshow.htm>>.
- Hopkinson, Neil, and Phill Dickens. "Rapid prototyping for direct manufacture." *Rapid prototyping journal* (2001).
- Santana, Leonardo, et al. "Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica." *Matéria*, Rio de Janeiro 23.4 (2018).
- Takagaki, Luiz Koiti. "Tecnologia de impressão 3D." *Revista Inovação Tecnológica*, São Paulo 2.2 (2012): 28-40.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.