

AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS IMPRESSAS EM PLA POR TECNOLOGIA FDM

Luiz Carlos Santana de Freitas, luizcsdefreitas@unifebe.edu.br¹

Rodrigo Blödorn, rodrigoblodorn@unifebe.edu.br¹

Denis Boing, denisboing@unifebe.edu.br¹

¹UNIFEBE – Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123 - Bairro Santa Terezinha - CEP: 88352-400 - Brusque - SC - Cx. Postal 1501

Resumo: A aplicação das impressoras 3D com tecnologia FDM para a fabricação de peças para prototipagem e também para produtos finais traz benefícios no desenvolvimento rápido de projetos e produtos através de uma visualização facilitada do produto final, além da fácil reprodução de geometrias complexas. Entretanto, é importante que se busque avançar nos métodos de controle de qualidade dos produtos impressos, principalmente visando à otimização das características dimensionais e, consequentemente, maior qualidade do produto final. Neste contexto, um conjunto de procedimentos experimentais foi planejado afim de aumentar a compreensão sobre a qualidade dimensional de produtos impressos. Inicialmente foi desenvolvido um corpo de prova com as dimensões de 25,4 mm de altura, 12,7 mm de largura e comprimento, sendo impressos 3 corpos de prova em 3 impressoras MAKERBOT Replicator 5th Generation. Estas dimensões foram verificadas em uma Máquina de Medições por Coordenadas (MMC), modelo Crysta-Plus M443 da fabricante Mitutoyo. Foram observados desvios dimensionais médios de -0,077 mm na largura, -0,067 mm na altura e -0,102 mm no comprimento. Após fabricados e medidos os primeiros corpos de prova, com o intuito de avaliar características e formas mais complexas, foi desenvolvido e fabricado um segundo modelo de corpo de prova, combinando prismas e cilindros. Repetindo o processo de medição descrito anteriormente e analisando os dados obtidos, pode-se perceber maiores desvios na largura e comprimento da base, bem como no diâmetro do maior cilindro. Foram estabelecidas tolerâncias de $\pm 0,10$ mm de paralelismo entre as faces da base, e planeza das mesmas, perpendicularidade entre os cilindros e a base e cilindridade dos diâmetros dos cilindros.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, FDM, Avaliação dimensional e geométrica.

1. INTRODUÇÃO

A demanda pelo desenvolvimento de produtos em pouco tempo fez com que emergisse um novo paradigma chamado Prototipagem Rápida (Sood *et al.*, 2012), a necessidade de se reduzir o tempo no ciclo de idealização, concepção e construção de um produto exige cada dia mais das tecnologias disponíveis. Para que então esta nova técnica se estabeleça é preciso que seja capaz de competir não apenas em viabilidade econômica com os processos de fabricação tradicionais amplamente difundidos, como a usinagem ou mesmo o processo de injeção de plástico, mas também garantir a qualidade e a confiabilidade dos produtos finais por ela produzidos (Magalhães, 2010).

Segundo Moncalvo (2016), o processo conhecido como Manufatura Aditiva trata da produção por adição de material, ao invés da remoção utilizada nos processos convencionais de fabricação. Com este tipo de tecnologia, a fabricação mecânica ganhou uma importante alternativa para solução de diversas limitações dos processos de manufatura existentes, ganhou-se na redução do tempo de produção, facilidade na utilização, visualização rápida do produto final, além da produção facilitada de qualquer tipo de geometria.

Em contrapartida, este processo precisa de um nível de controle mais rigoroso quanto às características de seus produtos. Peças produzidas por prototipagem rápida possuem menor precisão dimensional, bem como a qualidade de sua superfície é menor se comparadas a peças produzidas por processos de usinagem (Chua *et al.*, 2010). Isso se deve a vários fatores que podem influenciar no resultado do processo de fabricação, a exemplo da influência da umidade, que se acumula na estrutura do filamento (Henton *et al.*, 2005). Durante o processo de extrusão e consequente aquecimento do filamento a umidade tende a sair deste e gerar bolhas, isto causa defeitos estruturais na peça, devido à ausência do material ocasionado pela ocupação das bolhas (Costa, 2015).

Ainda, a cor do filamento também pode influenciar no resultado final, de acordo com Wittbrodt e Pearce (2015), em seu trabalho a respeito da influência das cores do filamento de PLA nas propriedades mecânicas de peças impressas.

Todas as cores, mesmo quando impressas com mesmas características, apresentam resistência à tração e porcentagem de cristalização distintas.

Além da retração do PLA devido ao seu resfriamento durante e após o processo de impressão, em seu compêndio, Canessa, Fonda e Zennaro (2013) já citam como sendo este um dos grandes problemas que afeta a precisão dimensional das peças impressas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A primeira parte do procedimento consistiu no projeto de um corpo de prova de formato prismático com dimensões de 25,4 mm de altura (eixo z), 12,7 mm de largura (eixo x) e comprimento (eixo y), como mostrado na Figura 1.

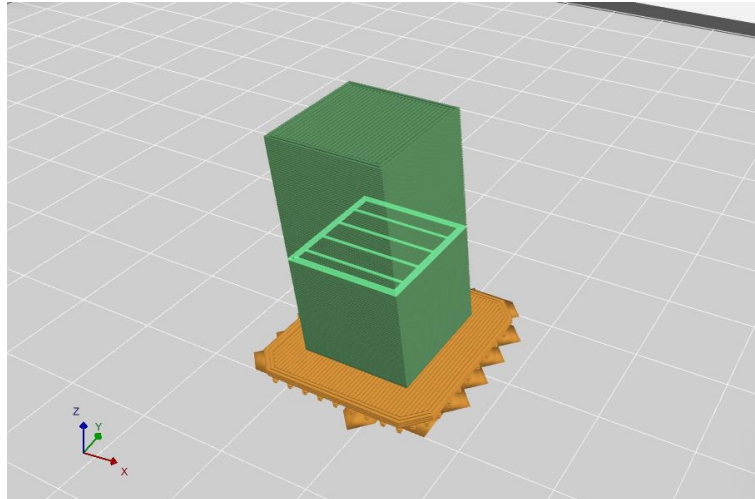


Figura 1. Simulação de impressão no *software* Makerbot Print e representação do sistema de coordenadas utilizado.

Após a criação do modelo descrito anteriormente, foram fabricados 9 corpos de prova (Figura 2.a), em 3 impressoras MakerBot, modelo Replicator 5th Generation (Figura 2.b), 3 em cada impressora, individualmente impressos no centro da base, utilizando-se como material para impressão filamento de PLA (ácido polilático), com 15% de preenchimento interno no formato linear, altura da camada de impressão de 0,2 mm e camadas exteriores com 2 cascas (Figura 1). Cada impressora realizou a impressão dos 3 corpos de prova com um rolo de filamento de cor diferente: azul (impressora 1), vermelho (impressora 2) e branco (impressora 3).

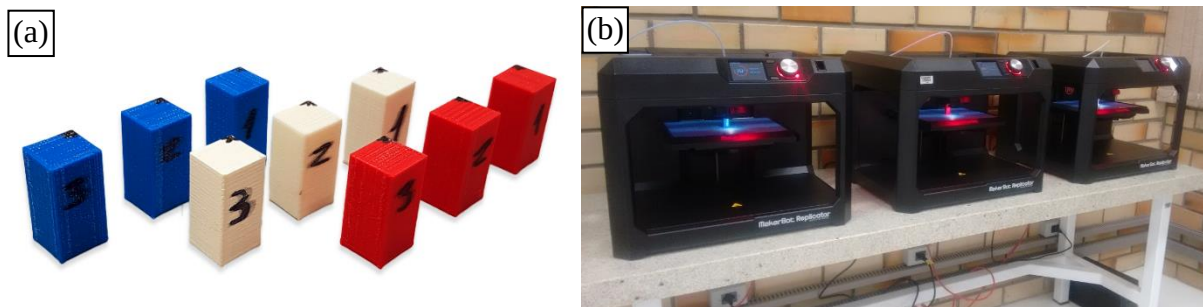


Figura 2. (a) Corpos de prova impressos em PLA; (b) Impressoras MakerBot Replicator 5th Generation.

As dimensões de cada corpo de prova foram medidas em uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), modelo Crysta-Plus M443 da fabricante Mitutoyo. Para realizar a medição da altura, largura e comprimento dos corpos de prova procedeu-se da seguinte maneira: cada face foi tocada pelo apalpador 9 vezes, sendo formado um plano médio a estes pontos. A distância então entre estes planos corresponde à distância entre as faces. (Figura 3).

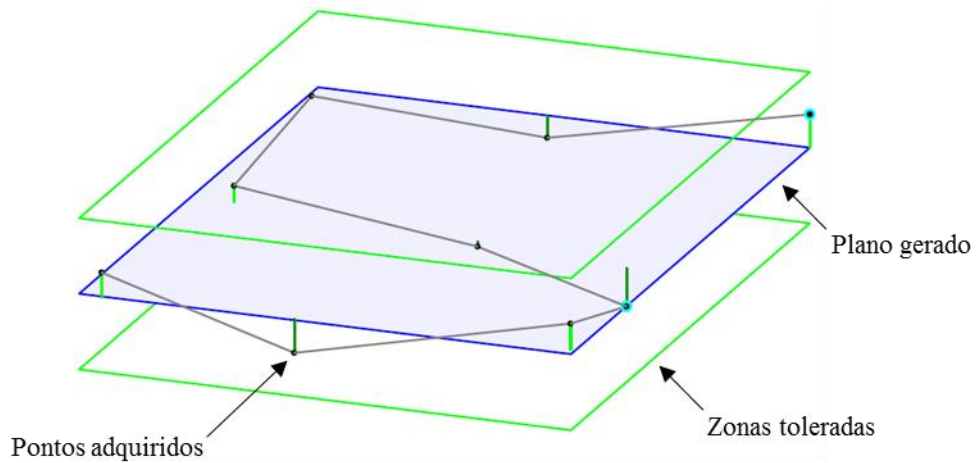


Figura 3. Plano gerado pelo software da MMC ajustado aos pontos adquiridos no procedimento de medição.

A segunda parte do procedimento experimental consistiu na avaliação de um segundo modelo de corpo de prova, composto por uma base de formato prismático, sobre a qual há três cilindros: um cilindro com um furo interno e dois cilindros sobrepostos de diferentes diâmetros (Figura 4).

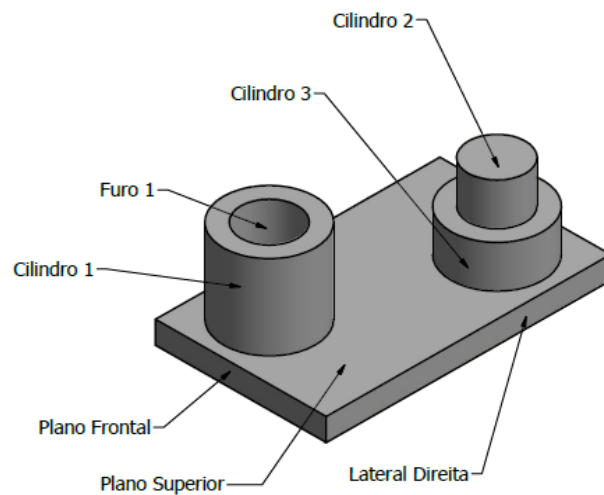


Figura 4. Corpo de prova da segunda parte dos experimentos.

As dimensões definidas no modelamento do corpo de prova são apresentadas na Figura 5, a seguir.

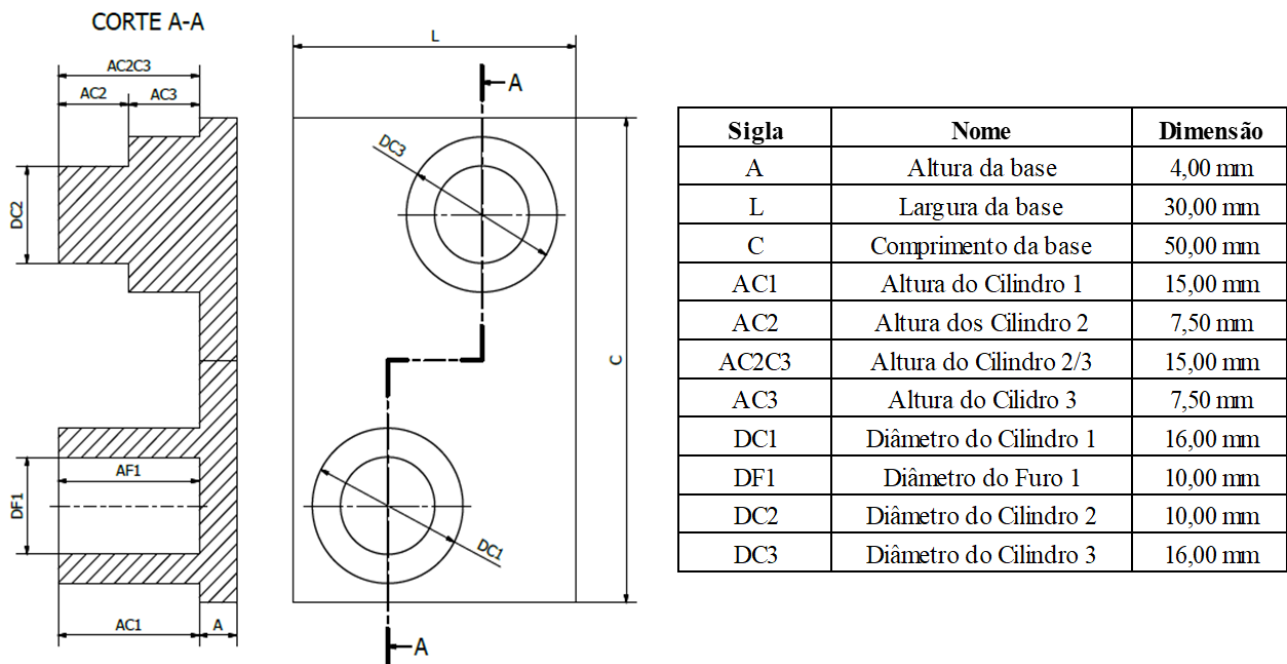


Figura 5. Características dimensionais toleradas no corpo de prova da segunda parte dos experimentos.

A tolerância dimensional adotada para as dimensões da Figura 5 foi de $\pm 0,10$ mm, que serão posteriormente controladas na MMC.

Além das tolerâncias dimensionais adotadas, foram definidas tolerâncias geométricas para alguns elementos do corpo de prova, buscando-se analisar diferentes características dos produtos impressos, conforme Figura 6.

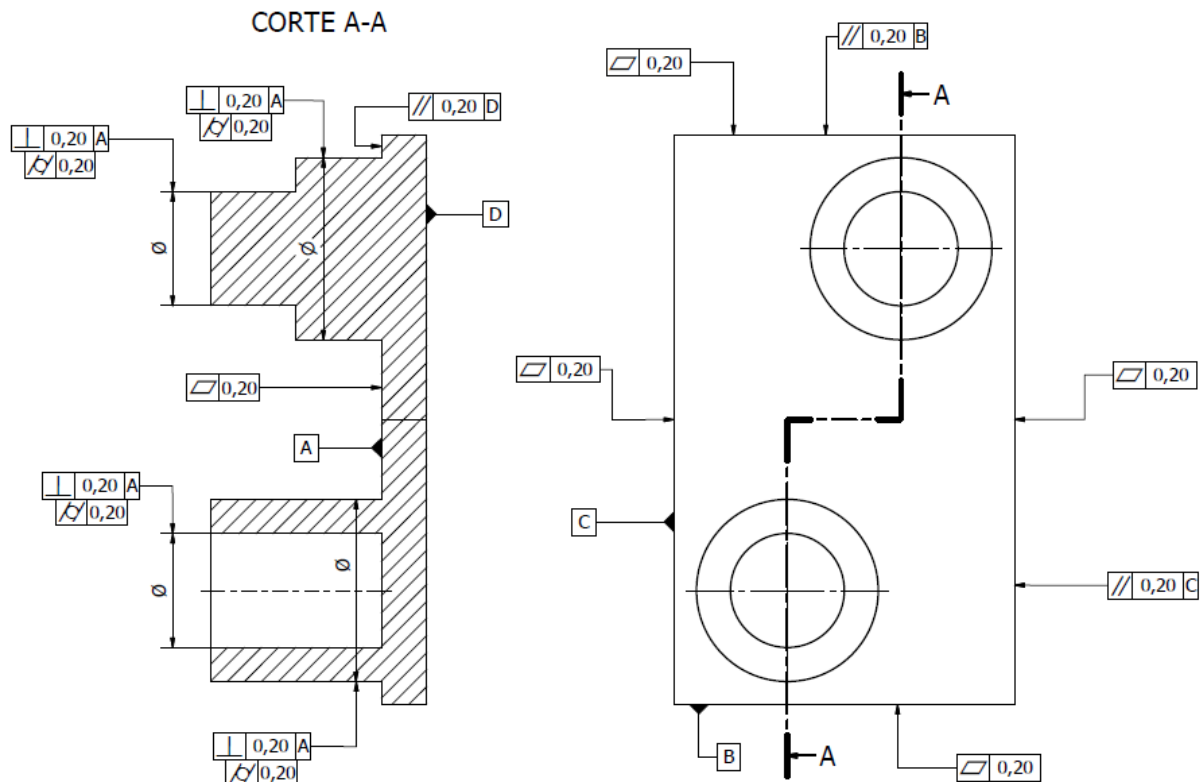


Figura 6. Tolerâncias geométricas do corpo de prova da segunda parte dos experimentos.

Este segundo modelo de corpo de prova contou com três peças produzidas, de forma individual em uma mesma impressora (impressora de número 2). As mesmas configurações de impressão mencionadas anteriormente, utilizadas no primeiro modelo de corpos de prova, foram utilizadas na impressão deste segundo modelo. Após fabricados, estes foram medidos também na mesma Máquina de Medição por Coordenadas utilizada no procedimento inicial (Figura 7).

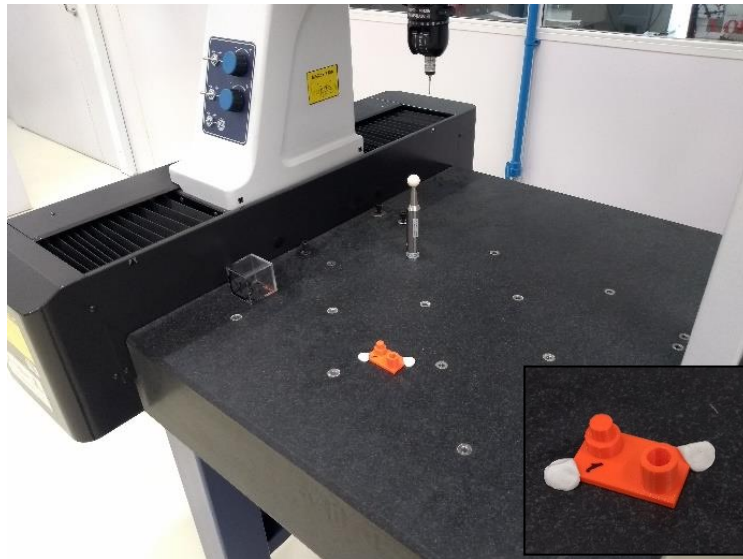


Figura 7. Detalhe da medição do corpo da segunda parte dos experimentos.

Após realizado o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova do segundo modelo pôde-se avaliar os resultados obtidos da produção de múltiplas geometrias em uma mesma peça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi possível analisar que os corpos de prova do modelo 1 apresentaram desvios dimensionais médios de $(-0,077 \pm 0,039)$ mm na largura, $(-0,067 \pm 0,019)$ mm na altura e $(-0,102 \pm 0,066)$ mm no comprimento (Figura 8).

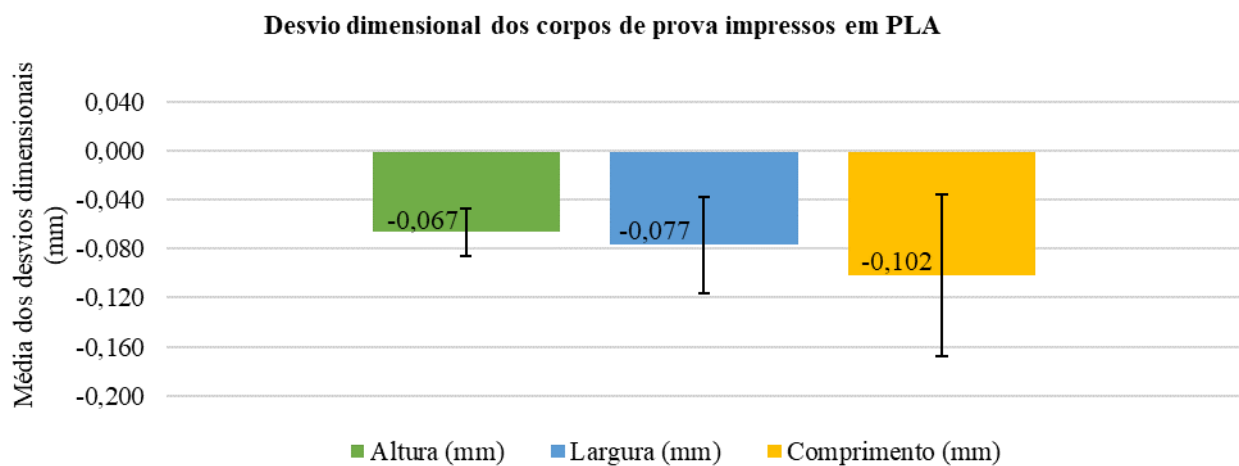


Figura 8. Desvio dimensional de todos os corpos de prova, independentemente da impressora.

Estes desvios representam a média de todos os corpos de prova produzidos, independentemente da impressora. Abaixo são apresentados os resultados dos desvios dimensionais dos corpos de prova produzidos por uma mesma impressora (Figura 9). Todos os desvios apresentados nos gráficos representam um intervalo de confiança de 95,45% de probabilidade.

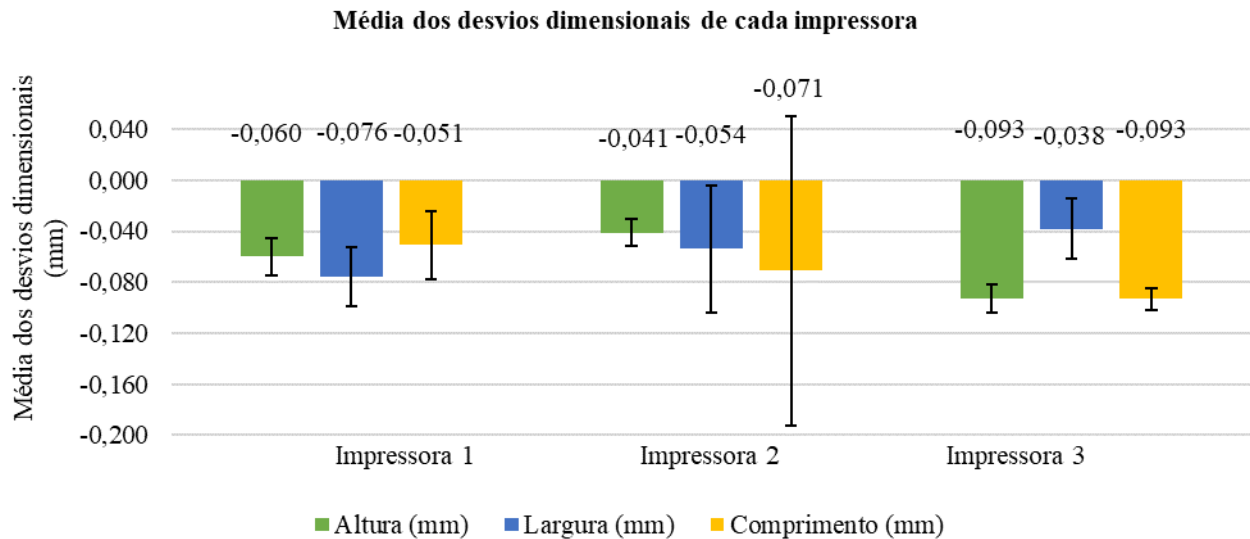


Figura 9. Desvio dimensional dos corpos de prova impressos em cada impressora.

Ao comparar o resultado observado em cada impressora, foram obtidos valores de desvio mínimo no comprimento e máximo na largura da impressora de número 1, desvio mínimo de altura e máximo de comprimento na impressora de número 2 e desvio mínimo na largura e máximo equivalente na altura e comprimento da impressora de número 3. Esta variação existente de máquina para máquina pode se dar devido aos procedimentos de calibração que cada uma destas foi submetida. Em todo processo de impressão o eixo Z da impressora é nivelado automaticamente, porém o alinhamento da base deve ser feito manualmente, o que pode acarretar em alguns desvios provenientes deste processo. Outro ponto é a própria construção da base de impressão, por se tratar de um processo de fusão e modelamento por deposição, imperfeições na base de impressão ou seu próprio desgaste podem gerar erros durante o processo.

Pode-se sugerir também que há influência da umidade acumulada no filamento base para impressão, conforme já mencionado por Henton *et al.* (2005) e Costa (2015). A cor do material pode também ter exercido influência no resultado (Wittbrodt e Pearce, 2015) porém a forma como os experimentos foram planejados e conduzidos não permite afirmar qual destas fontes exerce maior influência no processo.

Pode-se notar também que os desvios existentes nas peças produzidas são todos negativos, significando que estas estarão com dimensões ligeiramente menores que as desejadas, fato este advindo da retração do PLA durante o resfriamento deste. Este mesmo fenômeno já foi observado por Canessa *et al.* (2013).

A Tabela 2 apresenta os resultados médios obtidos das medições dos corpos de prova de modelo 2, para um intervalo de confiança de 95,45% da probabilidade.

Tabela 2. Desvios dimensionais e geométricos do corpo de prova da segunda parte dos experimentos.

		Dimensão	Média dos desvios ± Intervalo de confiança
Desvios dimensionais	Tolerâncias Dimensionais	Altura da base	0,053 ± 0,022 mm
		Largura da base	-0,190 ± 0,046 mm
		Comprimento	-0,217 ± 0,324 mm
		Altura do cilindro 1	-0,017 ± 0,054 mm
		Altura dos cilindro 2/3	0,028 ± 0,030 mm
		Altura do cilindro 2	-0,109 ± 0,090 mm
		Altura do cilindro 3	0,134 ± 0,132 mm
		Diâmetro do cilindro 1	-0,216 ± 0,168 mm
		Diâmetro do furo 1	-0,191 ± 0,235 mm
		Diâmetro do cilindro 2	-0,087 ± 0,144 mm
		Diâmetro do cilindro 3	-0,170 ± 0,166 mm
	Tolerâncias Geométricas	Cilindricidade C1	0,063 ± 0,056 mm
		Cilindricidade F1	0,057 ± 0,122 mm
		Cilindricidade C2	0,034 ± 0,051 mm
		Cilindricidade C3	0,069 ± 0,062 mm
		Planeza P.Posterior	0,024 ± 0,040 mm
		Planeza P.Frontal	0,021 ± 0,021 mm
		Planeza L.Direita	0,013 ± 0,012 mm
		Planeza L.Esquerda	0,009 ± 0,003 mm
		Planeza P.Superior	0,015 ± 0,016 mm
		Perpendicularidade C1	0,050 ± 0,086 mm
		Perpendicularidade F1	0,050 ± 0,131 mm
		Perpendicularidade C2	0,024 ± 0,026 mm
		Perpendicularidade C3	0,048 ± 0,017 mm
		Paralelismo Base	0,000 ± 0,001 mm
		Paralelismo Laterais	0,009 ± 0,003 mm
		Paralelismo Frontal	0,021 ± 0,021 mm

Analisando-se os desvios obtidos após a medição dos corpos de prova do modelo 2 (Tabela 2), pode-se perceber desvios um pouco maiores na largura da base (-0,190 mm) e comprimento da base (-0,217 mm), e um pouco menores na altura da base (0,053 mm).

As alturas dos cilindros comportaram-se de forma distinta, com desvios variando de -0,109 mm a 0,134 mm. Esta variação pode ter surgido por influência das formas produzidas, o Cilindro 1 possui erros menores na altura, por ser uma forma geométrica única. Por sua vez, nos Cilindros 2 e 3, que estão sobrepostos, o erro é propagado.

A variação do diâmetro segue o padrão esperado de erros negativos, variando de -0,087 mm a -0,216 mm, fato este que pode ser atribuído à retração do PLA durante o processo de resfriamento da peça em sua produção (como citado por Canessa *et al*, 2013), bem como a influência das outras características do material anteriormente citadas.

Quanto à cilindridade, os valores de desvio variaram de 0,034 mm a 0,069 mm. Estes podem ser associados à forma construtiva como a máquina produz o cilindro. O cabeçote de impressão, após completar o movimento em torno da geometria, passa a produzir o preenchimento e, depois, retorna à produção da geometria circular na camada superior (Figura 11). O resultado é uma espécie de crista na lateral do cilindro, fazendo com que o desvio de cilindridade deste aumente, podendo este motivo também ser o responsável pelos erros de perpendicularidade presentes no Cilindro 1 e, consequentemente, Furo 1, que estão em torno de 0,050 mm.

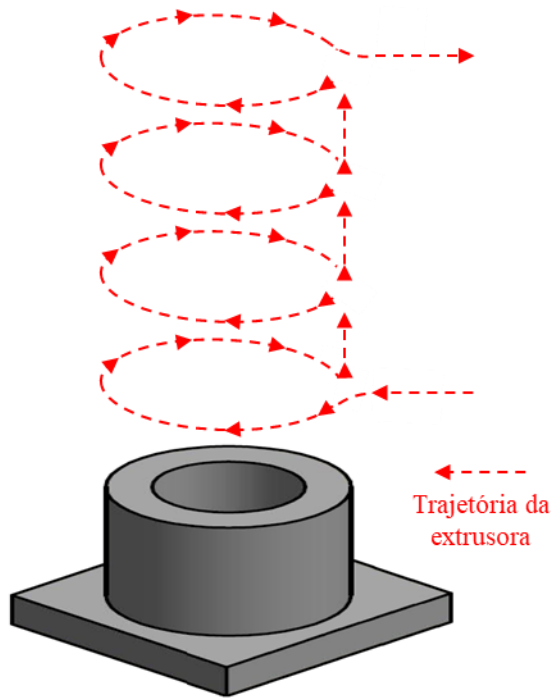


Figura 11. Ilustração da trajetória realizada pelo cabeçote de extrusão para construção da peça.

Outro motivo que pode influenciar os desvios encontrados de perpendicularidade é a movimentação da extrusora (Figura 12). A pouca rigidez do seu sistema de movimentação, baseado em correias sincronizadas, quando comparado a sistemas mais robustos, como de máquinas CNC – que utilizam fusos de esferas. Associa-se ainda a este fato a frequência com que esta se movimenta, alternando de uma geometria à outra para construção da peça camada a camada. Isto faz com que sua estrutura vibre e, conseqüentemente, exista um desvio advindo desta movimentação e a vibração gerada, associado também a contração do material no processo de impressão.

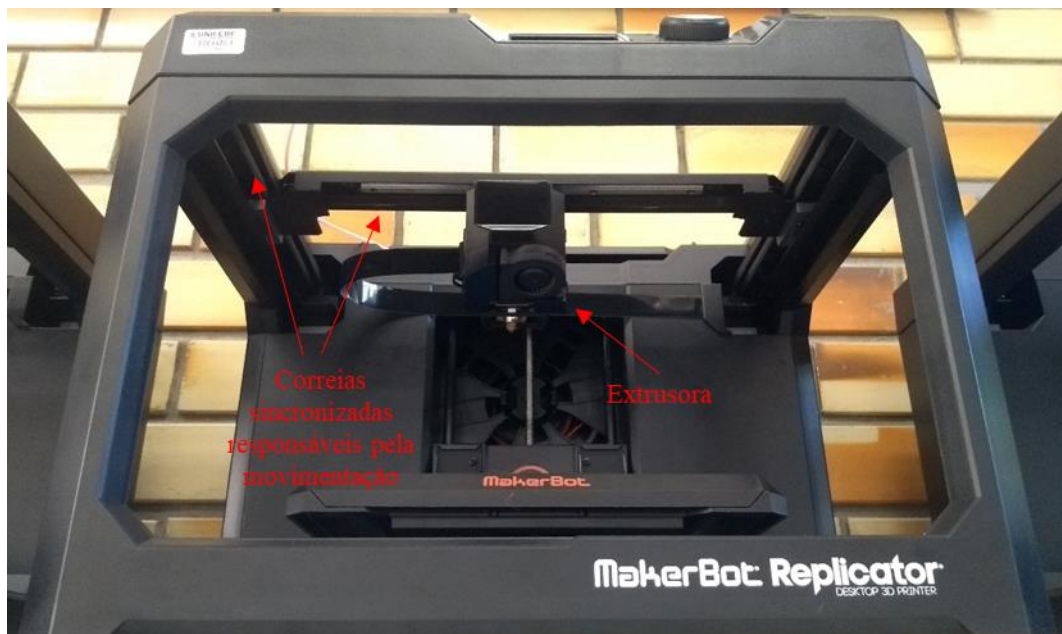


Figura 12. Vista da impressora com enfoque na estrutura de movimentação da extrusora.

Os desvios de planeza e paralelismo dos planos da base foram satisfatórios, estando todos dentro das tolerâncias pré-estabelecidas.

4. CONCLUSÃO

O processo de avaliação realizado forneceu resultados que possibilitam o aprimoramento dos conhecimentos e entendimento existente acerca da precisão dimensional de produtos impressos, considerando o método de impressão por fusão e deposição de polímero. Com a análise dos dados coletados percebe-se uma variação de resultados entre as próprias máquinas, no entanto, mesmo com os desvios observados e as variações existentes entre elas, o processo de impressão por tecnologia FDM apresenta resultados muito satisfatórios.

Na média das três dimensões avaliadas por impressora, a de número dois demonstrou maior exatidão dimensional em seus produtos, ou seja, suas peças apresentam dimensões mais próximas às projetadas, porém ainda com grande dispersão de resultados.

Com relação aos desvios geométricos observou-se que a planeza encontra-se de acordo com a tolerância projetada. Por sua vez, a perpendicularidade, quando na presença de geometrias mistas, como no caso de um cilindro com um furo concêntrico, acaba por gerar desvios maiores que em geometrias singulares. A criação de peças cilíndricas gera um desvio dimensional maior do que geométrico.

Todo este processo permite que, por meio do conhecimento do desempenho e das limitações das impressoras, os desvios dimensionais e geométricos, determinados durante a fase de projeto, sejam compensados, a fim de se produzir peças de acordo com as tolerâncias projetadas, atendendo às demandas e necessidades de seus usuários.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF) e ao Laboratório de Impressão 3D (In³D), do Centro Universitário de Brusque (UNIFEU), por terem disponibilizado sua infraestrutura para realização dos procedimentos experimentais; à FAPESC pelo edital que viabilizou a estruturação do Laboratório In³D; e ao UNIEDU pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

6. REFERÊNCIAS

- Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M., 2013, “Low-cost 3D Printing: for Science, Education and Sustainable Development”. Trieste, Itália: ICTP Science Dissemination Unit.
- Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010 “Rapid Prototyping: Principles and Applications”. 3rd ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 165–171.
- Costa, G.M., 2015, “Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D”. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento de Engenharia Mecatrônica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET - MG, Divinópolis. Disponível em: <<http://www.divinopolis.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/8/2017/02/Guilherme-Menezes-Costa.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- Henton, D.E., Gruber, P., Lunt, J., Randall, J., 2005, “Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites”. Polylactic Acid Technology In: Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, editors. CRC press; 2005. pp. 555–562.
- Magalhães, L.C. *et al.*, 2010, “A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas Pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)”, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba.
- Moncalvo, F.C., 2016, “Análise dimensional para capacidade de uma máquina de FDM”. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018246.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.
- 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, Vol. 3, pp. 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>. Acesso em: 10 out. 2017
- Wittbrodt, B., Pearce, J.M., 2015, “The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components”. Additive Manufacturing. 09 out. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DIMENSIONAL EVALUATION OF PRINTED PARTS IN PLA WITH FDM 3D PRINTERS

Luiz Carlos Santana de Freitas, luizcsdefreitas@unifebe.edu.br¹

Rodrigo Blödorn, rodrigoblodorn@unifebe.edu.br¹

Denis Boing, denisboing@unifebe.edu.br¹

¹UNIFEBE – Centro Universitário de Brusque, Rua Dorval Luz, 123 - Bairro Santa Terezinha - CEP: 88352-400 - Brusque - SC - Cx. Postal 1501

Abstract: *The application of 3D printers with FDM technology for the manufacture of parts for prototyping as well as for finished products brings benefits in the rapid development of projects and products through an easy visualization of the final product, besides the fast reproduction of complex geometries. However, it is extremely important to seek to advance the quality control methods of the printed products, mainly in order to optimize the dimensional characteristics and, consequently, higher quality of the final product. In this context, a set of experimental procedures was planned in order to increase understanding about the dimensional quality of printed products. Initially, a specimen was developed, with dimensions of 25.4 mm in height, 12.7 mm in width and length, being printed 3 specimens on 3 printers MAKERBOT Replicator 5th Generation. The main dimensions of the specimens were verified in a Coordinate Measuring Machine (CMM), model Crysta-Plus M443 from Mitutoyo. Mean dimensional deviations of -0.077 mm in width, -0.067 mm in height and -0.102 mm in length were observed. After making and measuring the first test specimens, with the purpose of evaluating more complex characteristics and shapes, a second model of test specimens was developed and manufactured, combining prisms and cylinders. Repeating the measurement process described above and analyzing the data obtained, one can notice larger deviations in the width and length of the base, as well as in the diameter of the larger cylinder. The tolerance ± 0.10 mm of parallelism between the faces of the base and their flatness, perpendicularity between the cylinders and the base and cylindricity of the cylinder diameters was also established to better characterize the specimens.*

Keywords: Additive Manufacturing, FDM, Dimensional and geometrical evaluation.