

Avaliação Dimensional de Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva para Aplicação em Veículos Autônomos

Filipe Pereira Berardi^{1,2}, Pedro Humberto de Accioly Costa², Vilson Berilli Mendes¹, Doina Mariana Banea²

¹Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), Rio de Janeiro /RJ – Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET), Rio de Janeiro /RJ – Brasil

Resumo – O uso de drones em aplicações civis e militares tem crescido devido à redução de custo dos veículos. Em geral, drones precisam ser produzidos com estruturas leves e com alta precisão dimensional, permitindo uma maior autonomia e melhor orientação espacial, respectivamente. A Manufatura Aditiva tem sido cada vez mais explorada para a fabricação de drones por permitir a fabricação de peças leves, devido ao processo de fabricação que pode definir diferentes percentuais de preenchimento interno, controlando assim sua densidade. Entretanto, ainda há pouco estudo sobre o efeito dos parâmetros de padrão e percentual de preenchimento na tolerância dimensional dos componentes. Este estudo visa avaliar, de acordo com a norma DIN 7168, o impacto do padrão e percentual de preenchimento na tolerância dimensional de peças fabricadas por Impressão 3D utilizando máquina de baixo custo e os filamentos PLA e ABS, mais populares no mercado.

Palavras-Chave – Manufatura Aditiva, Drone, Avaliação Dimensional.

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, os veículos autônomos têm se tornado capazes de desempenhar atividades cada vez mais diversas, reduzindo a exposição da vida humana às situações de risco e permitindo ampliar o conhecimento acerca do ambiente marinho [1].

Veículos Autônomos têm uma ampla gama de aplicações em diversas áreas como Inspeção de Infraestruturas, Resgate e Operações de Emergência, Logística e Entregas, Pesquisa Científica, Aplicações Militares e outras. Em aplicações militares, o uso de Veículos Autônomos logra contribuir como uma forte vantagem tática, uma vez que podem representar uma extensão de embarcações de guerra e de veículos terrestres, por meio da utilização dos Veículos Autônomos Submarinos (VSA) e/ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT/Drones) [2].

Os drones assumiram um papel de liderança no contraterrorismo e na contra insurgência e são projetados para ter uma importância crescente em futuras operações militares. Seu baixo custo os tornam descartáveis, o que é ideal para missões altamente perigosas ou politicamente sensíveis. No entanto, limitações técnicas, bem como prováveis melhorias em tecnologias concorrentes, nomeadamente sistemas de defesa aérea, devem circunscrever o papel militar dos drones [3].

Com base no estudo de [4], pode-se observar que a impressão 3D é amplamente utilizada em diversas áreas. Dentre as principais aplicações da impressão 3D, destaca-se a impressão de peças funcionais, que já corresponde a cerca

de 29% de todo o uso dessa tecnologia. Em muitos casos, também é possível se obter produtos impressos por MA com acabamento e estruturas confiáveis, de modo que possam ser utilizados como produto final [5]. Essas informações indicam que a impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia cada vez mais relevante e com potencial para revolucionar a produção de produtos finais.

Como exemplo de MA em aplicações com Drones, é possível observar nos trabalhos apresentados por [6] e [7] que, de um modo geral, os propósitos em utilizar a tecnologia MA na produção de Drones visam redução de peso e otimização topológica da estrutura mecânica com objetivo de ampliar o alcance, reduzir o custo de produção dos protótipos e aumentar a velocidade de fabricação. Entretanto, segundo [7], algumas das dificuldades encontradas para projetar, construir, testar e pilotar um drone, utilizando impressoras 3D, incluem erros de montagem, problemas de dimensionamento e incompatibilidade de software.

A estimativa inicial do desvio de rota dos veículos autônomos deve incluir contribuições de erro tanto da *Inertial Measurement Units* (IMU) quanto do sistema mecânico que a mantém no posicionamento requisitado durante a operação. Compreender o impacto que estes erros têm nas principais funções de um sistema de navegação ajuda a estabelecer metas de desempenho relevantes que evitam sobrecarregar o problema, ao mesmo tempo que gere o risco de perder desempenho chave e compromissos de custos [8].

De acordo com [9], mecanismos mostrados em uma análise estatística de tolerância, o real estado da arte relacionado especificamente a impressão 3D carece de métodos adequados para resolver problemas derivados dos mecanismos das impressoras. Complementarmente, [10] sublinham a complexidade do processo de impressão, enfatizando a extensa gama de parâmetros e limites. Em seu trabalho, [9] destacou artigos cujo o foco trata sobre precisão, tolerâncias, parâmetros de processo, etc. Em [11], por exemplo, é proposto que para a tecnologia FDM, é essencial uma análise completa e sistemática da precisão, da tolerância e da repetibilidade. Adicionalmente, [12] destacou imperfeições como folgas nas juntas e desvios geométricos que dependem de parâmetros de processos específicos da máquina. Entretanto, Kacmarcik et al. [13] demonstram que uma peça de referência relativamente simples pode ser uma boa opção para avaliar eficazmente a precisão de várias características geométricas e revelar diferenças entre duas impressoras 3D de mesa em termos de precisão.

Em [14] é apresentada uma investigação referente a influência da espessura da camada e da densidade de preenchimento na tolerância geométrica de peças produzidas por FDM, entretanto, o estudo de [14] foi realizado apenas para o material Nylon e utilizou uma máquina que possui um custo mais elevado do que a utilizada neste trabalho. Neste sentido, este artigo visa contribuir na avaliação da regularidade da precisão dimensional de peças empregadas como elementos finais em montagens de estruturas mecânicas, produzidas por impressora 3D e cujas dimensões estejam de acordo com a tabela de tolerância Norma DIN 7168 Grau Médio [15], ratificando a possibilidade de se utilizar máquinas de baixo custo e materiais mais usuais na produção de veículos autônomos em série.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxo do processo de impressão 3D ocorre a partir da criação de um modelo tridimensional através de um *software* CAD (Computer-Aided-Design) [16]. Este modelo é convertido para um arquivo em formato de estereolitografia (STL), que simplifica o modelo original para um conjunto de elementos triangulares. Este arquivo é então dividido horizontalmente (ou fatiado) por meio de um *software* de fatiamento, em diversas camadas, Fig. 1b, representando os contornos bidimensionais, que quando depositadas umas sobre as outras através do processo denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM) formam o modelo tridimensional original [17].

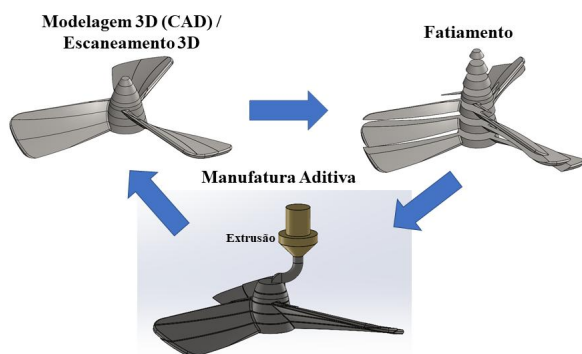


Fig. 1. Conceito básico do processo de MA.

Antes de apresentar a metodologia empregada para este estudo é relevante relatar informações sobre a instrumentação utilizada, algumas definições referentes aos parâmetros para geração de corpos de provas e o procedimento de inspeção dimensional adotado.

A. Instrumentação

Neste artigo, tomou-se como base a instrumentação empregada por [9]. Ou seja, analogamente, foi utilizada a impressora 3D CREALITY ENDER-3 PRO, cuja precisão é de $\pm 0,1$ mm. No caso do software de fatiamento CURA, para este trabalho, foi utilizada a versão 5.7.1. O material de extrusão utilizado por [9] foi o filamento de PLA (grau A - 100% original, e material inócuo, branco, 1,75 mm), neste trabalho foi acrescentada uma investigação também para o filamento ABS (grau A - 100% original, e material inócuo, branco, 1,75 mm), ambos conforme especificações do fabricante 3D LAB. A pesquisa com base nesses materiais é

interessante por serem facilmente encontrados no mercado, de custo acessível, com observância em diversas aplicações.

Os corpos de prova foram desenvolvidos e fabricados no Laboratório de Prototipagem (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha. Em relação a inspeção dimensional, foi realizada no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha. Todas as medições foram obtidas por meio de uma máquina tridimensional modelo B-251 Mitutoyo, com última calibração feita em 22/09/2022, contendo o software MCOsmOS-Manual v3.0 R3 Edition 17.

B. Designação do Corpo de Prova (CP)

Nesta seção são apresentados o detalhamento e as considerações tomadas como critério de decisão para determinar os parâmetros considerados na definição do modelo do CP.

1) *Melhorias de Impressão*: Conforme orienta [9], realizou-se a calibração do fluxo de material da extrusora, com a adequação da relação passos/mm e nivelamento da mesa.

2) *Modelo CAD e conversão do arquivo em STL*: Com base no modelo de CP utilizado por [9], adotou-se para a implementação tridimensional do CP no programa *Solidworks* 2022, um toro com a dimensão do diâmetro interno de 35 mm, diâmetro externo de 50 mm e altura de 10 mm, conforme Fig. 2.

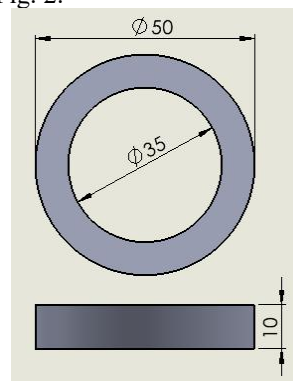


Fig 2: Modelo tridimensional do CP. Fonte: Autor.

De acordo com a referência [9], percebe-se que existe influência do refinamento da malha triangular do arquivo STL nas dimensões de objetos circulares. Portanto, para a conversão do arquivo CAD para STL, a configuração do programa *Solidworks* foi personalizada para a resolução máxima, com os valores de tolerância de 0,0035mm para o parâmetro “Desvio” e de 0,5° para o ângulo, Fig. 3.

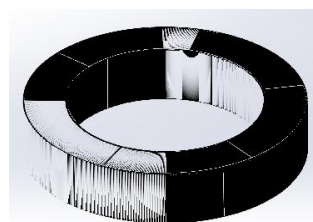


Fig 3: Modelo do CP em STL com alta resolução. Fonte: Autor.

3) *Processo de Fatiamento*: Partindo dos parâmetros padrão do programa CURA, foi realizado uma análise preliminar dos parâmetros de fatiamento a serem adotados na fabricação do CP, implementando as alterações propostas por [9]. Os parâmetros do CP 01 estão representados na Tabela 1.

TABELA I: PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CP 01

	PLA
Temperatura de extrusão (°C)	200
Temperatura de mesa (°C)	60
Preenchimento Interno (%)	100
Tipo de Preenchimento	Linha
Orientação do Preenchimento	45°
Avanço Linear	0
Expansão Horizontal Inicial (mm)	0
Dimensão de Furo (mm)	0
Temperatura ambiente (°C)	27
Umidade (%)	44
Início da Camada	Posterior

Em seguida, foi produzido o CP 02, alterando o parâmetro de Avanço Linear para 25 e o CP 03, com Avanço Linear de 25, Expansão Horizontal Inicial de -0,2mm e Dimensão de Furo de 0,13mm, que foram os recursos utilizados por [9]. Ao comparar as dimensões em duas alturas diferentes destes corpos de prova, foi possível concluir que os parâmetros utilizados por [9] realmente foram os que produziram os CPs com dimensões mais próximas das do modelo CAD. Com isso, foi determinado os parâmetros para a produção dos CPs subsequentes, Tabela 2.

TABELA II: PARÂMETROS DE IMPRESSÃO CPs

	PLA	ABS
Temperatura de extrusão (°C)	200	230
Temperatura de mesa (°C)	60	100
Altura entre o bico e mesa (mm)	0,2	0,2
Diâmetro do Filamento (mm)	1,75	1,75
Preenchimento Interno (%)	20 e 100	20 e 100
Tipo de Preenchimento	Linha, Grade e Giróide	Giróide
Orientação do Preenchimento	45°	45°
Velocidade de impressão (mm/s)	50	50
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,4	0,4
Avanço Linear	25	25
Expansão Horizontal Inicial (mm)	-0,2	-0,2
Dimensão de Furo (mm)	0,13	0,13
Temp. ambiente (°C)	23 a 28	23 a 28
Umidade (%)	entre 44 a 65	entre 50 a 65
Início da Camada	Posterior	Posterior

Em relação ao percentual de preenchimento interno, para este artigo, optou-se por avaliar a configuração desse parâmetro em 100% e 20%, correspondente ao valor máximo e o valor padrão do programa CURA, permitindo a avaliação de 2 casos extremos. Quanto ao padrão de preenchimento, foram selecionados arbitrariamente os tipos linha, grade e giróide.

4) *Impressão 3D*: A fabricação dos CPs ocorreu na impressora 3D Ender 3 Pro, utilizando os filamentos PLA e ABS da marca 3D Lab, em sala com ambiente monitorado, com temperatura entre 23 e 28°C e umidade entre 44 a 64%. Além disso, para facilitar a adesão do CP à mesa durante a extrusão, foi utilizada cola bastão da marca Scotch, composta por Polivinil.

C. Inspeção Dimensional

O levantamento dimensional das peças ocorreu no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas da Marinha, em ambiente monitorado com temperatura de 22°C e umidade entre 45 a 60%. O procedimento de medição para cada dimensão, diâmetro interno e externo, foi realizado pelo contato da ferramenta em quatro pontos equidistantes, em duas alturas distintas do CP. A medição de cada dimensão em duas alturas se faz necessária devido a possível presença do erro de impressão denominado de “pata de elefante”, correspondente a uma variação dimensional que pode ocorrer na base das peças, repercutindo em um aumento de dimensão para medidas externas de eixos e diminuição para medidas internas de furos. Esta discrepância pode ocorrer em função da distância ajustada entre o bico extrusor e a mesa de impressão, que leva a compressão do material depositado nas primeiras camadas, fazendo com que o material extravase lateralmente [9], conforme pode ser observado na Fig. 4.

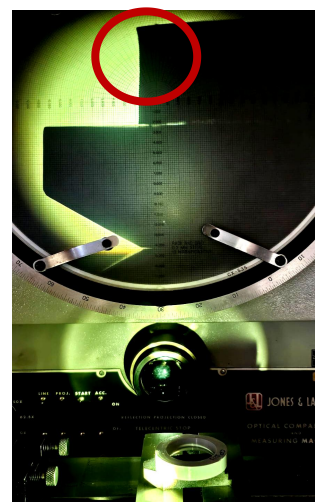


Fig 4: Modelo impresso em projetor de perfil apresentando anomalia “Pata de Elefante”. Fonte: Autor

Desta forma, definiu-se duas alturas para serem avaliadas nos CPs, a primeira com uma altura $H1 = 1$ mm, próximo as primeiras camadas para avaliar o efeito da “pata de elefante”, e a segunda $H2 = 8$ mm, distante o suficiente da base para garantir que a “pata de elefante” não afete significativamente a dimensão nominal dos CPs. Ambas medidas referenciadas à base da mesa de impressão.

D. Metodologia da Investigação

Para este estudo, adotou-se como procedimento de investigação a medição das dimensões de três corpos de prova para cada conjuntura de tipo (Linha, Grade e Giróide) e percentual (20 e 100%) de preenchimento. Para cada CP foi calculada a média e o desvio padrão das dimensões dos diâmetros internos e externos, nas alturas $H1$ e $H2$.

O esquema dos CPs produzidos pode ser observado no fluxograma apresentado na Fig. 5.

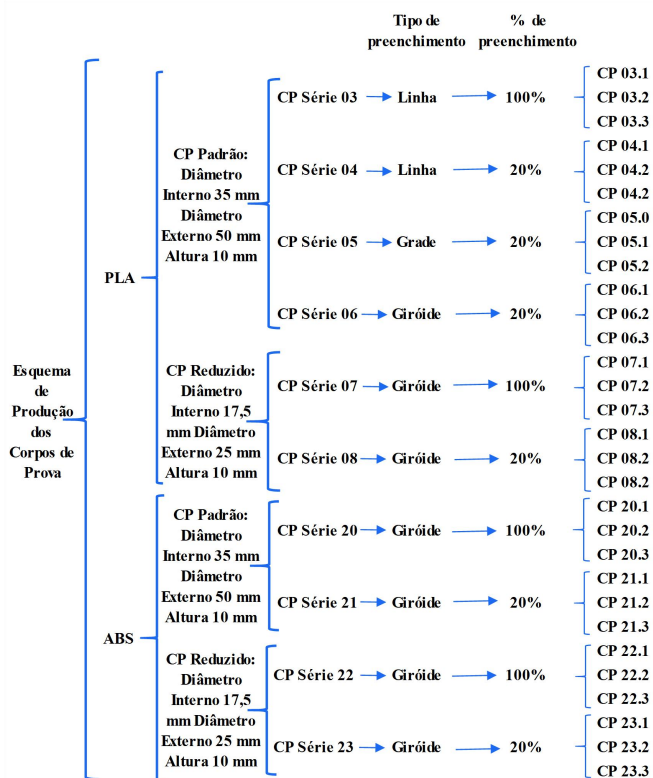


Fig 5: Fluxograma dos Corpos de Prova (CP). Fonte: Autor.

Adicionalmente, foi feita uma nova avaliação alterando os diâmetros externo e interno, reduzindo os valores para a metade do valor inicial do CP 03, Fig. 5.

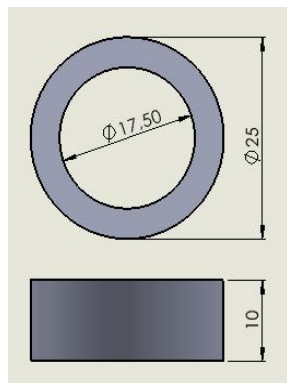


Fig 6: Modelo do CP reduzido. Fonte: Autor.

Desta forma, com CPs Reduzidos, as dimensões do diâmetro externo e interno se enquadram em outra faixa de Tolerância Dimensional da Norma DIN7168 - Grau Médio, conforme pode ser observado na Fig. 6, possibilitando verificar se o comportamento das tolerâncias se mantém ou não com relação a ordem de grandeza das dimensões.

TOLERÂNCIA LONGITUDINAL DIN 7168								
DIMENSÃO	> 0,5	> 3	> 6	> 30	> 120	> 315	> 1000	> 2000
GRÁU	≤ 3	≤ 6	≤ 30	≤ 120	≤ 315	≤ 1000	≤ 2000	≤ 4000
MÉDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Fig 7: Norma DIN7168 - Grau Médio

Para os CPs com diâmetros menores optou-se por avaliar apenas os produzidos no percentual de 20% no padrão Giróide, pois este foi o padrão que apresentou a maior discrepância em relação à dimensão nominal do modelo

CAD na investigação inicial, e também com percentual de 100% de preenchimento.

III. RESULTADOS

Todos os corpos de provas tiveram os diâmetros internos e externos medidos nas alturas definidas (H1 e H2), e posteriormente realizada a média e desvio padrão de cada série. Para ilustrar o procedimento de investigação dos dados coletados, é possível observar os valores obtidos para as medições de H2 da série CP03, apresentadas na Tabela III.

TABELA III: RESULTADOS DA SÉRIE CP 03

Codificação	H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
CP 03.1	35,079	49,785	100	Linha
CP 03.2	35,031	49,878	100	Linha
CP 03.3	35,014	49,839	100	Linha
Média CP 03.1, 03.2, 03.3	35,041	49,834	100	Linha
Desvio Padrão	0,040	0,039		

Na Tabela IV, pode-se observar os valores das médias da série dos CP's maciços (preenchimento 100%) e as séries dos CP's com 20% de preenchimento e com os padrões: Linha, Grade e Giróide.

TABELA IV: MÉDIAS E DESVIO PADRÃO - SÉRIES 03, 04, 05 e 06

Codificação	H2		Preenchimento Interno (%)	Tipo de Preenchimento
	D. Int. (mm)	D. Ext. (mm)		
Média CP 03.1, 03.2, 03.3	35,085	49,896	100	Linha
Desvio Padrão	0,040	0,039		
Média CP 04.1, 04.2, 04.3	35,107	49,861	20	Linha
Desvio Padrão	0,023	0,007		
Média CP 05.1, 05.2, 05.3	35,124	49,871	20	Grade
Desvio Padrão	0,031	0,020		
Média CP 06.1, 06.2, 06.3	35,155	49,884	20	Giróide
Desvio Padrão	0,041	0,013		

Na Tabela III, é possível observar que a média da série CP 06, com tipo de preenchimento Giróide, apresenta o valor mais distante da média da série CP 03 para diâmetro interno, sendo a diferença de 0,07 mm e de 0,155 mm para o valor nominal de 35 mm, entretanto, ambos também enquadrados na tolerância DIN 7168 - Grau Médio. Ademais, é interessante observar que, no caso do diâmetro externo, a diferença é ainda menor. Vale destacar também que a maior diferença entre a medida das séries dos CP's é de 0,035 mm e a diferença para o valor nominal de 50 mm é de 0,139 mm. Outra informação importante a ser destacada é que a série de CP's com preenchimento total apresentam o diâmetro externo maior e o diâmetro interno menor em relação as

demais séries, provavelmente por excesso de material depositado.

Nos gráficos I, II, III e IV (Fig. 8 e Fig. 9), apresenta-se os valores das médias dos diâmetros dos CP's da investigação inicial, com tamanho padrão, e dos CP's menores com redução de 50% nos diâmetros. Desta forma, é possível avaliar a relação da tolerância em outra faixa de ordem de grandeza.

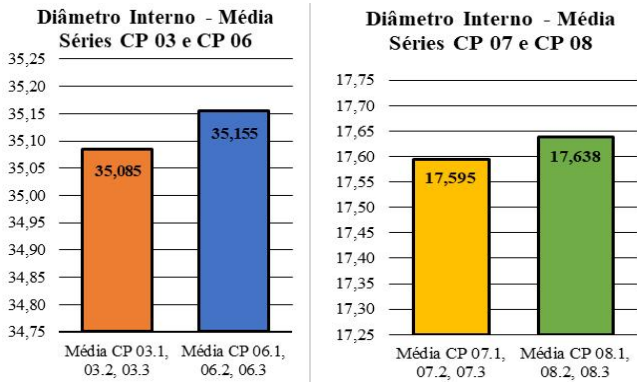


Fig 8: Gráficos I e II: Dados de Diâmetros Internos

Observa-se nos gráficos I e III que as séries de tamanho padrão (CP03 e CP06) apresentam variação de 0,07 mm e 0,012 mm para os diâmetros internos e externos respectivamente, enquanto as séries dos CP's reduzidos, gráficos II e IV, apresentam variação de 0,043 mm e 0,058 mm. Com isso, não é possível observar uma relação direta entre a tolerância e a ordem de grandeza das medidas, mas sim o mesmo comportamento na variação do diâmetro externo maior e diâmetro interno menor, no caso dos CP's maciços em relação aos demais CP's.

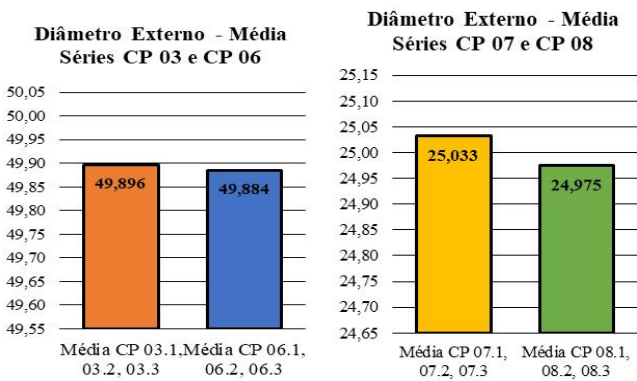


Fig 9: Gráficos III e IV: Dados de Diâmetros Externos

O mesmo estudo foi feito para o material ABS e apresentado nos gráficos V, VI, VII e VIII (Fig. 10 e Fig. 11), sendo possível observar um comportamento similar ao PLA. Porém destaca-se que todas as médias das séries do material ABS são menores que as médias de suas respectivas séries no material PLA.

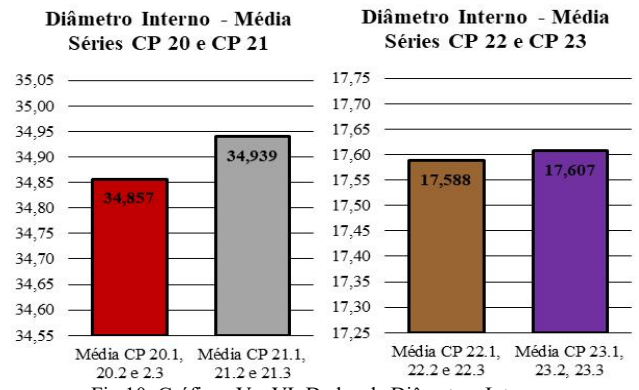


Fig 10: Gráficos V e VI: Dados de Diâmetros Internos

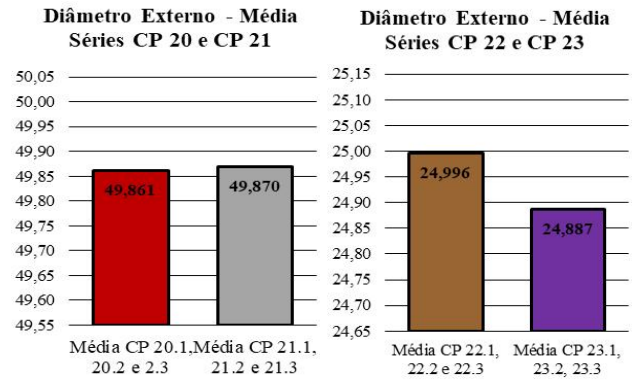


Fig 11: Gráficos VII e VIII: Dados de Diâmetros Externos

De um modo geral, apesar de todos os resultados estarem dentro da tolerância recomendada pela Norma DIN7168 GRAU MÉDIO observa-se que o desvio padrão dos CP's é de no máximo 0,075mm.

IV. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados neste artigo, conclui-se que existe possibilidade de produzir peças empregadas como produto final, em série, fabricadas por Impressão 3D utilizando máquina de baixo custo e materiais de fácil obtenção, cujas dimensões estejam de acordo com a tabela de tolerância Norma DIN 7168 Grau Médio [15]. Portanto, a utilização dessas peças em estruturas mecânicas de veículos autônomos pode ser de grande valia em situações politicamente sensíveis.

Adicionalmente, os resultados apresentados ratificam o que relata o autor da referência [17], ou seja, que o material ABS tem uma taxa de compressão maior que o PLA, e que peças maciças impressas tendem a expandir aumentando o diâmetro externo e diminuindo o interno.

Apesar das medidas encontradas respeitarem a Norma DIN 7168 - Grau Médio, ainda é possível obter valores mais próximos aos valores nominais das dimensões compensando, por exemplo, os erros sistemáticos durante a modelagem tridimensional dos CP's. Desta forma, visando atender a norma DIN 7168 - Grau Fino [15], é válido ampliar a pesquisa avaliando outros materiais e outros parâmetros de impressão. Também é interessante acrescentar aos estudos posteriores avaliações dimensionais referentes a outras formas geométricas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Dunbabin, L. Marque, "Robotics for Environmental Monitoring", [From the Guest Editors], IEEE Robotics & Automation Magazine, IEEE, v. 19, n. 1, p. 20–23, 2012.
- [2] W. H. Adnan, et al., "Drone Use in Military and Civilian Application: Risk to National Security", Journal of Media and Information Warfare, v. 15(1), p. 60-70, 2022.
- [3] P. Mahadevan, "The Military Utility of Drones", CSS Analyses in Security Policy V.78, Center for Security Studies (CSS), ETH Zurich, 2010.
- [4] S. C. Ligon, et al., "Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing", Chemical Reviews, n. 117, p. 10212–10290, 2017.
- [5] E. C. Mendonça, et al., "Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva", Revista Pesquisa Naval, n. 32, p. 10-16, 2020.
- [6] N. Muralidharan, et al., "Structural analysis of mini drone developed using 3D printing technique", Materials Today: Proceedings, n. 46, p. 8748–8752, 2021.
- [7] R. Radharamanan, et al., "Use of 3D Printers to Design, Build, Test and Fly a Quadcopter Drone", The Journal of Management and Engineering Integration Vol. 9, No. 1, 2016.
- [8] M. Looney, "The Basics of MEMS IMU/Gyroscope Alignment", Analog Dialogue p. 49-06, June 2015.
- [9] I. Grgić, et al., "Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields", Processes 2023, 11, 2810, 2023.
- [10] O. Zemicik, e J. Sedlak, "Application of Linear Optimization on Parameters of 3D FDM Print", Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, v. 26, n. 4, jul. 2019.
- [11] F. O. Drozda, T.R. Pereira, A. E. Patterson, "End-User Manufacturing with FDM/FFF: Interfaces, Tolerances, Repeatability, and Dimensional Accuracy", 2020 IISE Annual Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, 2020.
- [12] P. Schaechtel, B. Schleich, e S. Wartzack, "Statistical Tolerance Analysis of 3D-Printed Non-Assembly Mechanisms in Motion Using Empirical Predictive Models", Applied Sciences, v. 11, n. 4, p. 1860, 20 fev. 2021.
- [13] J. KACMARCÍK, et al., "An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 393, p. 012085, 10 ago. 2018.
- [14] P. Pombinha, et al., "A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in Fdm", 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018), Singapore, p. 14–17, May 2018.
- [15] DIN 7168, "General tolerances for linear and angular dimensions and geometrical tolerances", DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1991.
- [16] A. A. GORNI, "Introdução a prototipagem rápida e seus processos", Revista Plástico Industrial, p. 230–239, 2001.
- [17] S. AHN, et al., "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". Rapid prototyping journal, 2002.