

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO USO DE DISPOSITIVOS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA NO PROCESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE DE ATRIBUTOS DIMENSIONAIS

Pablo Antunes da Rosa

Thiago Zacarkin

Grupo Boticário, Av. Rui Barbosa, 4350, São José dos Pinhais, Paraná
pablo.rosa@grupoboticario.com.br, thiago.zacarkin@grupoboticario.com.br

Leandro Campos Gonçalves

Grupo Boticário, Av. Rui Barbosa, 4350, São José dos Pinhais, Paraná
leandro.goncalves@grupoboticario.com.br

Desirée Cigaran Schuck

Grupo Boticário, Av. Rui Barbosa, 4350, São José dos Pinhais, Paraná
desirees@grupoboticario.com.br

Resumo: As indústrias de cosméticos, higiene e perfumaria são caracterizadas pela dinamicidade de seu portfólio associado ao seu grande número de produtos. Esse aspecto torna o processo de controle da qualidade dos atributos dimensionais desafiador quando avaliados em máquinas de medir por coordenadas (MMC), por exemplo, uma vez que faz-se necessária a utilização de dispositivos específicos para garantir a repetibilidade do posicionamento durante o ensaio. Dessa forma, este projeto buscou uma forma de reduzir os custos e o tempo de projeto/fabricação de dispositivos pelo método convencional (usinagem) através da utilização de manufatura aditiva, permitindo também sua otimização geométrica. Neste estudo, um dispositivo foi modelado computacionalmente e depois manufaturado através do processo de modelagem por deposição fundida (FDM) com filamento em poli(ácido lático) (PLA) com três diferentes densidades de impressão (D1, D2 e D3) e associado à esferas de aço resultando em um sistema de fixação 3-2-1, garantindo a imobilidade dos seis graus de liberdade do mensurando. Durante o início do processo de avaliação, os dispositivos foram digitalizados com scanner tridimensional (Zeiss Comet L3D 250) para acompanhamento de sua geometria e posteriormente foram submetidos a mil ciclos de reposicionamento da amostra com avaliação dimensional (MMC Zeiss O-Inspect 322) a cada dez ciclos. Os dispositivos foram avaliados através de estudo de estabilidade de longo prazo, posterior à aprovação do sistema de medição em estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) e da medição da amostra padrão. Além disso, após a conclusão das avaliações, a capacidade do sistema de medição foi expressa numericamente pelos índices de capacidade bilateral (C_g) e de capacidade para processos de medição não centralizados (C_{gk}) para fins comparativos. Os três dispositivos avaliados apresentaram boa estabilidade a longo prazo quando comparados com a tolerância dos mensurandos. Também, na avaliação da capacidade do processo, somente o dispositivo de maior densidade manteve-se com índices superiores a 1,33 nas três características avaliadas, sendo assim, o único considerado capaz. A comparação com geometria original permitiu identificar os pontos de contato com maior variação e refletiu os resultados da capacidade. Esse projeto possibilitou a avaliação da aplicação de dispositivos com menor tempo de projeto/fabricação, além de menor custo e maior facilidade de manuseio e armazenamento. Entretanto, o balanço entre custo e vida útil comparados aos dispositivos construídos através de usinagem é necessário para aplicação em larga escala e em outros campos de aplicação.

Palavras-chave: manufatura aditiva, metrologia, dimensional, impressão 3D.

1. INTRODUÇÃO

O grande aumento de vendas da indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos (HPPC) impulsiona o desenvolvimento de novos produtos a cada ano, tornando seu portfólio dinâmico e com alta diversidade de geometrias de embalagens (ABIHPEC, 2023). Esse é um dos fatores que dificultam o processo de controle da qualidade de atributos dimensionais desses componentes.

Para um controle dimensional efetivo, é necessária a garantia da repetibilidade de todo o sistema de medição, incluindo o sistema de fixação da amostra. Caso o sistema não seja estável ou suficiente, erros de medição podem resultar em falsas reprovações ou falsas aprovações, impactando no custo do produto.

Usualmente, na indústria são utilizados dispositivos de fixação fabricados em alumínio ou aço por apresentarem boa estabilidade a longo prazo. Entretanto, devido aos fatores anteriormente citados, a indústria de produtos HPPC encontra problemas nessa aplicação, como por exemplo: pelo custo de fabricação dos dispositivos, falta de espaço para

armazenamento devido à grande quantidade e pela rapidez da descontinuação dos produtos, causando o descarte dos dispositivos.

Por esses motivos, este estudo buscou avaliar a aplicabilidade de dispositivos de fixação fabricados em material polimérico por manufatura aditiva (também conhecido por impressão 3D), especificamente com olhar metrológico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Neste estudo foi avaliada a aplicação de um dispositivo de fixação no processo de controle dimensional de um produto de perfumaria da marca O Boticário®.

Pela disponibilidade de equipamento e material, o dispositivo foi fabricado através do processo de modelagem por deposição fundida (FDM – *Fused Deposition Modeling*) com filamento em poli(ácido láctico) (PLA) que, além de baixo custo, trata-se de um material biodegradável (TEIXEIRA et al., 2021).

Foram fabricados dispositivos com três diferentes densidades de impressão (preenchimento interno da peça impressa) associados a esferas de aço para o contato direto com a amostra resultando em um sistema de fixação 3-2-1, garantindo a imobilização dos seis graus de liberdade.

Os três dispositivos foram codificados como: D1 (densidade 25%), D2 (densidade 50%) e D3 (densidade 75%) e essa nomenclatura será utilizada no decorrer deste trabalho.

2.2. Métodos

2.2.1. Validação do equipamento de medição e medição da amostra padrão

Todos os experimentos foram desenvolvidos nas instalações do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Grupo Boticário, no laboratório de Tecnologia de Materiais.

Nas avaliações dimensionais foi utilizado uma máquina de medir por coordenadas (MMC) modelo O-Inspect 322 do fabricante Carl Zeiss. Previamente ao início do estudo, a fim de validar o desempenho metrológico do equipamento, foi realizado estudo de repetibilidade e reprodutibilidade conforme Albertazzi e Souza (2018) com critério de aprovação $\%R\&R < 10\%$.

Através de amostragem aleatória, foi selecionada uma amostra de um frasco comumente utilizado pelo Grupo Boticário em seus produtos (Fig. 1a), já conhecido dos consumidores e realizada a medição das dimensões de interesse sem a utilização de dispositivo de fixação. Foram executados 10 ciclos de medição, seguidos do cálculo de média, amplitude e desvio padrão dos resultados para utilização como valores de referência.

Os elementos geométricos definidos para a medição são apresentados na Fig. 1b e podem ser listados como um cilindro e um plano. Através desses dois elementos, criou-se um elemento teórico: um círculo resultante da intersecção. Já as características de interesse foram: o diâmetro do cilindro e as coordenadas x, y e z do centro do círculo teórico.



Figura 1. (a) Frasco utilizado na realização dos ensaios. (b) Elementos geométricos avaliados

Para fins de padronização e baseado em Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH (2014), foram definidos os parâmetros de execução das medições conforme apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Elementos e parâmetros utilizados nos ensaios dimensionais

Elemento	Estratégia	Quantidade de pontos	Velocidade [mm/min]	Característica
Cilindro	3 seções circulares de 360°	1270 pontos cada seção	5,0	Diâmetro de controle

Plano	1 seção circular de 360°	1270 pontos	5,0	-
Círculo teórico	Intersecção entre cilindro e plano	1 (teórico)	-	Coordenadas x, y e z do centro

2.2.2. Impressão 3D do dispositivo de fixação

O dispositivo a ser utilizado foi modelado tridimensionalmente para posterior fabricação em impressora modelo 3Dcloner modelo ST g3 com tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM) e os seguintes parâmetros de impressão: temperatura da base de impressão: 60 °C e temperatura do bocal: 200 °C. Como citado anteriormente, foi utilizado filamento para impressão de poli(ácido láctico)(PLA) com diâmetro de 1,75 mm.

Após a impressão, foram adicionadas aos dispositivos 6 esferas de aço para o contato com a amostra. Na Fig. 2 é possível visualizar o projeto do dispositivo.

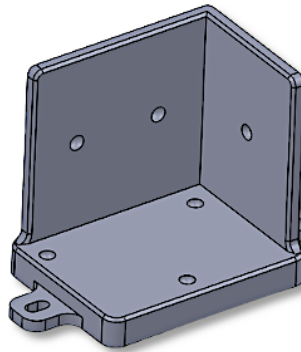


Figura 2. Projeto do dispositivo seguido de sua representação real pós finalização

Para o processo de fabricação, outro parâmetro adotado foi o tipo de padrão de impressão, nesse caso adotado o triangular. Na Fig. 3 é possível visualizar essa padronização e as três diferentes densidades avaliadas.

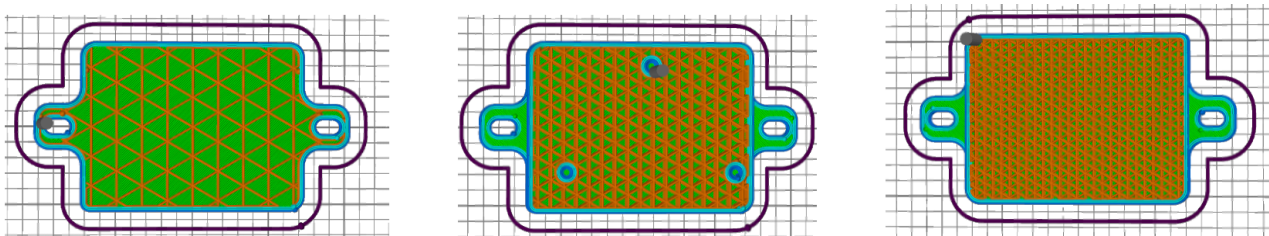


Figura 3. Padrão triangular de impressão nas três densidades avaliadas (D1, D2 e D3 – da esquerda para direita)

2.2.3. Medições

Primeiramente, os três dispositivos passaram por digitalização tridimensional a fim de se avaliar a alteração geométrica de sua superfície ao final dos ensaios. As digitalizações foram executadas em escâner Carl Zeiss modelo Comet L3D 5M associado às câmeras de campo de visão de 250 mm e com capturas em mesa rotativa (360° capturados a cada 10°), parâmetros definidos baseados em Li *et al.* (2017).

Posteriormente, a amostra foi posicionada nos dispositivos de fixação e executada medição dos elementos geométricos com os mesmos parâmetros utilizados nas avaliações iniciais, conforme apresentado na Tab. 1. Os dispositivos foram submetidos à mil ciclos de reposicionamento da amostra e foram executadas cinco medições a cada dez ciclos de reposicionamentos a fim de acompanhar a evolução dos resultados.

Após o milésimo ciclo de reposicionamento, os dispositivos passaram por nova digitalização tridimensional para a comparação geométrica com o estado inicial.

Os quatro resultados numéricos das características avaliadas (diâmetro de controle do cilindro e as coordenadas x, y e z do centro do círculo teórico) foram avaliados separadamente através de estudo de estabilidade a longo prazo com o cálculo de médias ($\bar{X}$), amplitude ($\bar{R}$) e de seus limites de controle (UCL_X , LCL_X , UCL_R , LCL_R). Os resultados foram calculados através das Eq. (1) a (6) (WHEELER e LYDAY, 1989; WHEELER, 1995) onde: (p) representa o ciclo de repetição da medição no mesmo ciclo de reposicionamento, (m) representa a quantidade total de repetições da medição, (j) representa o ciclo de repetição de reposicionamento, (n) representa a quantidade total de ciclos de reposicionamento e (X) representa o resultado da medição.

a) Média das médias

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{pj} \quad (1)$$

b) Amplitude média

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m [(maxX_{pj} - minX_{pj}) \forall j] \quad (2)$$

c) Limite superior de controle da média

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + \bar{R} \cdot A_2 \quad (3)$$

d) Limite inferior de controle da média

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - \bar{R} \cdot A_2 \quad (4)$$

e) Limite superior de controle da amplitude

$$UCL_R = \bar{R} \cdot D_4 \quad (5)$$

f) Limite inferior de controle da amplitude

$$LCL_R = \bar{R} \cdot D_3 \quad (6)$$

Para as Eq. (3) a (5) foram adotadas as constantes $A_2 = 0,577$, $D_4 = 0$ e $D_4 = 2,114$ (ALBERTAZZI e SOUZA, 2018).

Além disso, os resultados foram utilizados para avaliação dos índices de capacidade bilateral (C_g) e de capacidade para processos de medição não centralizados (C_{gk}) conforme Eq. (7) e (8) de Albertazzi e Souza (2018) e Chrysler Group *et al.* (2010) para fins comparativos.

a) Índice de capacidade bilateral

$$C_g = \frac{U_{adm}}{6 \cdot s_g} \quad (7)$$

Sendo:

U_{adm} incerteza de medição admissível. Adotado como 1/10 do intervalo de tolerância da característica.

s_g estimativa do desvio-padrão associado ao processo de medição, calculado pela Eq. (9).

b) Índice de capacidade de medição não centralizados

$$C_{gk} = \frac{U_{adm} - |Td|}{6 \cdot s_g} \quad (8)$$

Sendo:

Td a tendência em relação ao resultado de referência conforme Seção 2.2.1.

c) Estimativa do desvio-padrão associado ao processo de medição

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m (X_p - \bar{\bar{X}})^2}{m - 1}} \quad (9)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Validação do equipamento de medição

Conforme descrito na Seção 2.2.1, o desempenho metrológico da MMC foi validado através de estudo de repetibilidade com critério de aprovação $\%R\&R < 10\%$. Para tal avaliação foi utilizada esfera padrão calibrada e o resultado foi de 2,13 %, desta forma, constatou-se que o processo de medição foi aprovado na comparação com a variação total dos resultados.

3.2. Medição da amostra padrão

As características de interesse foram medidas na amostra utilizada no estudo para posterior comparação quantitativa dos processos de medição. Os resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Resultados da medição da amostra padrão

Elemento	Característica	Média [mm]	Amplitude [mm]	Desvio padrão [mm]
Cilindro	Diâmetro de controle	21,2960	0,0001	0,0000
Círculo teórico	Coordenada x do centro	31,8494	0,0008	0,0003
	Coordenada y do centro	20,7534	0,0004	0,0002
	Coordenada z do centro	116,0675	0,0062	0,003

3.3. Estudo de estabilidade a longo prazo

Os resultados da avaliação de estabilidade a longo prazo são apresentados graficamente abaixo. A Fig. 4 apresenta os resultados para o diâmetro de controle, seguido das Fig. 5, 6 e 7 com os resultados das coordenadas x, y e z do centro do círculo teórico, respectivamente.

Nas figuras abaixo é possível identificar as siglas como: UCL_X limite superior de controle para média; $\bar{X}$ média das médias; LCL_X limite inferior de controle para média; UCL_R limite superior de controle para amplitude; R amplitude média e LCL_R limite inferior de controle para amplitude.

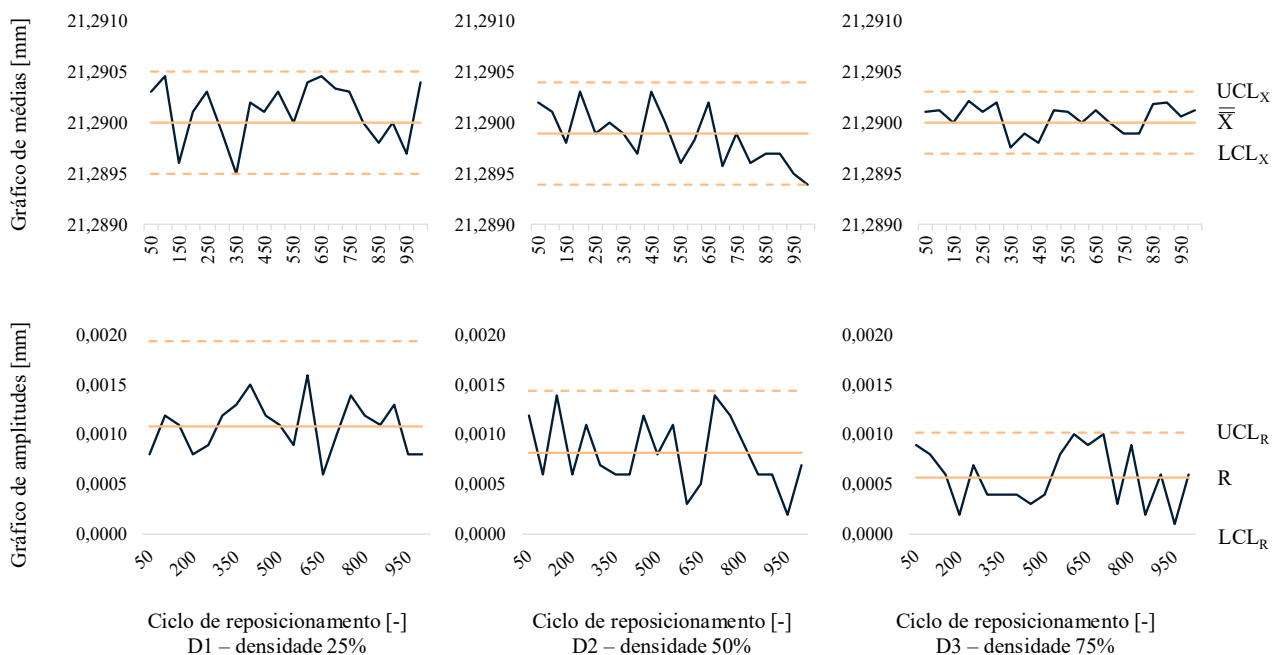


Figura 4. Resultados de estabilidade a longo prazo para o diâmetro de controle

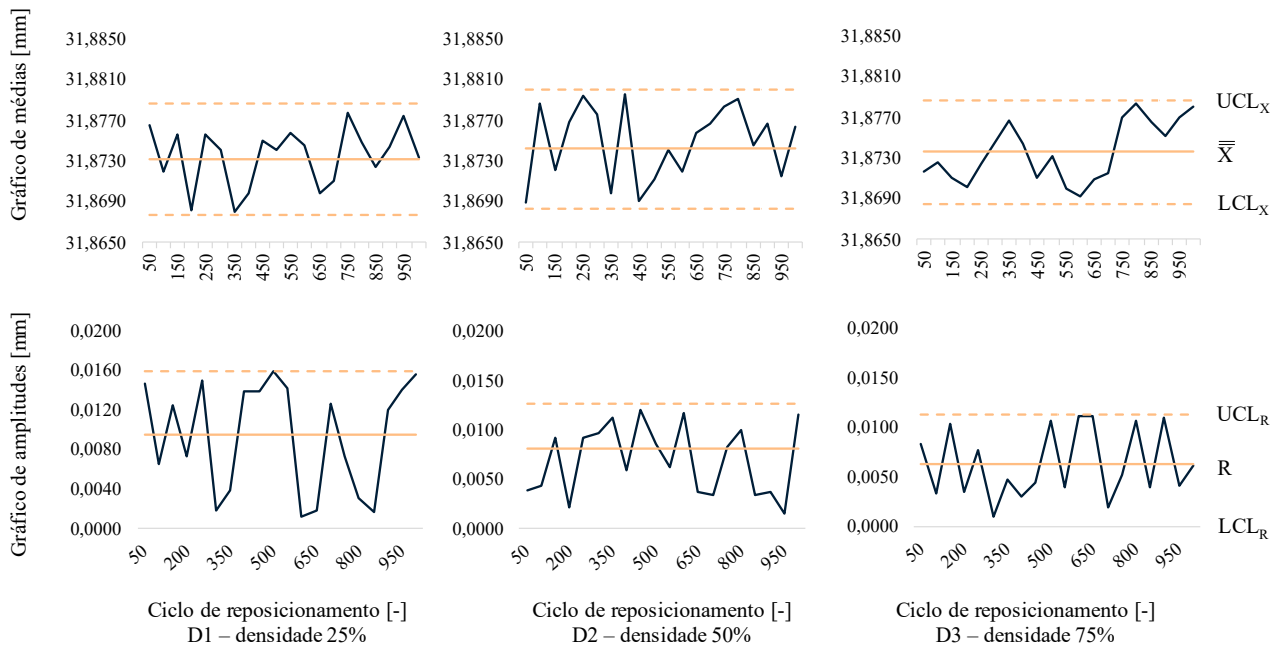


Figura 5. Resultados de estabilidade a longo prazo para a coordenada x do centro do círculo teórico

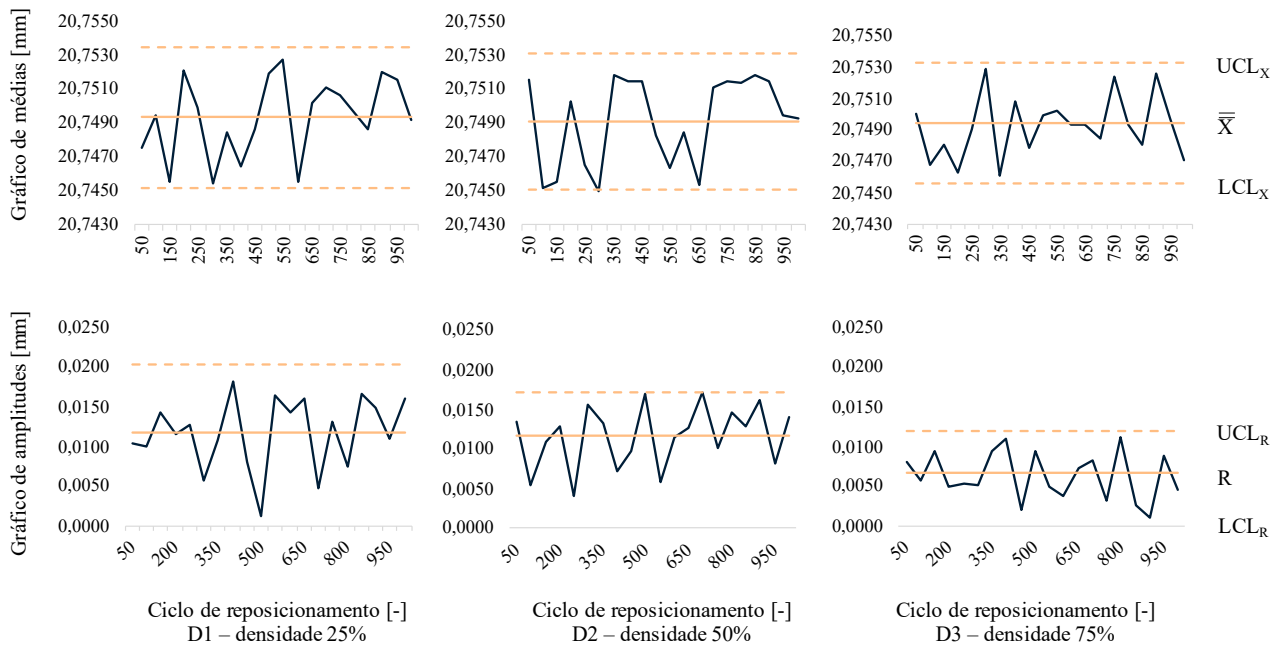


Figura 6. Resultados de estabilidade a longo prazo para a coordenada y do centro do círculo teórico

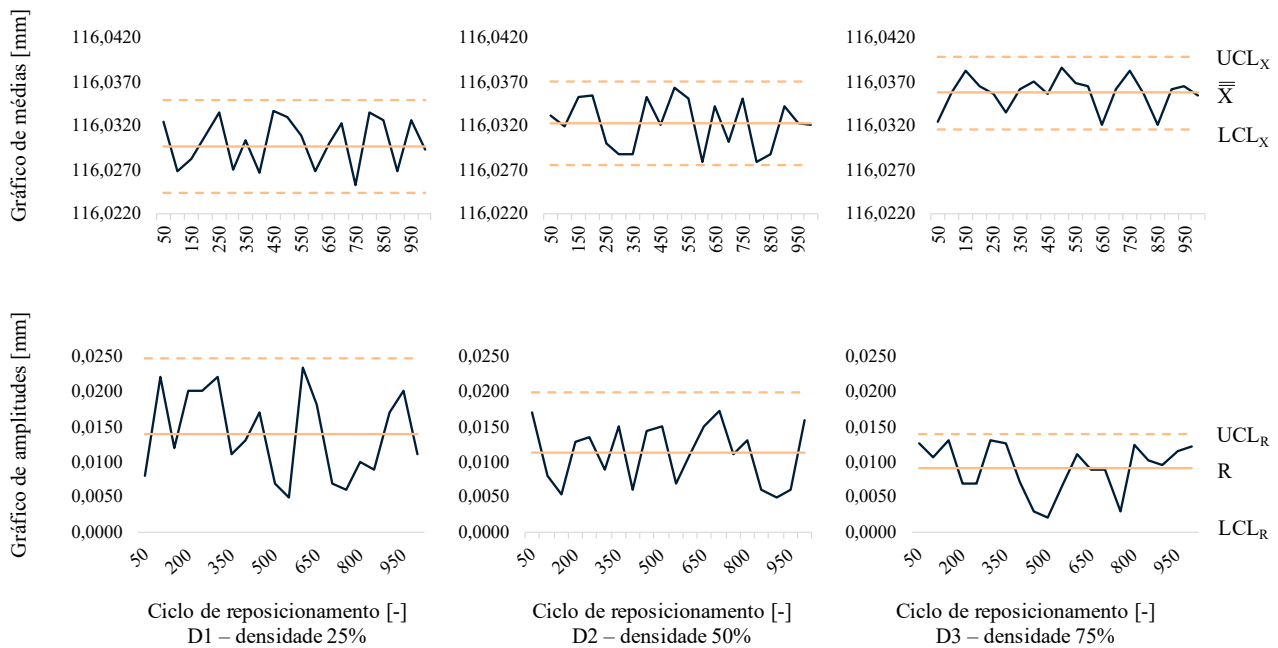


Figura 7. Resultados de estabilidade a longo prazo para a coordenada z do centro do círculo teórico

Através da análise conjunta das Fig. 4 a 7 é possível identificar que não houve grandes diferenças nos resultados de médias das características, exceto para a coordenada z do centro do círculo teórico. Tal comportamento pode ser explicado pelo maior esforço demandado devido à coordenada z ser a referência primária de posicionamento da amostra no dispositivo.

Já nas avaliações da amplitude, nota-se que quanto menor a densidade ($D1 < D2 < D3$), maior amplitude, ou seja, há maior variação entre as medições durante os ciclos de reposicionamento. Entende-se que as esferas metálicas podem se acomodar no decorrer das medições, o que explicaria a variação.

3.4. Estudo de capacidade do processo de medição

Para classificar as três densidades, da melhor para pior, faz-se necessário ainda avaliar os índices de capacidade (Cg e Cgk), que são apresentados na Tab. 4. Como intervalo de tolerância (aplicados nas Eq. (7) e (8)) foram utilizados: 0,8 mm para o diâmetro de controle e 2,0 mm para as coordenadas do centro do círculo teórico.

Tabela 4. Resultados dos índices de capacidade do processo de medição

Elemento	Característica	D1 - densidade 25%		D2 - densidade 50%		D3 - densidade 75%	
		Cg	Cgk	Cg	Cgk	Cg	Cgk
Cilindro	Diâmetro de controle	5,78	2,36	6,24	2,40	12,44	5,01
Círculo teórico	Coordenada x do centro	2,88	1,49	2,33	1,14	2,86	1,47
	Coordenada y do centro	3,62	3,32	3,21	2,94	4,22	3,87
	Coordenada z do centro	2,99	0,76	2,95	0,87	4,44	1,62

Ambos os índices (Cg e Cgk) mostraram que o processo de medição está apto estatisticamente (maiores que 1,33 conforme Montgomery e Runger (2021)) para o controle dimensional do diâmetro de controle. Por outro lado, quando avaliados para as coordenadas, observa-se que o processo se mostra incapaz nos dispositivos com densidades D1 e D2 (25 e 50%, respectivamente). Dessa forma, fica claro que somente o dispositivo D3 poderia ser utilizado para controle dimensional no processo produtivo, considerando sua vida útil de até 1000 ciclos de reposicionamento.

3.5. Variação geométrica

E para finalizar as avaliações, a Fig. 10 apresenta a variação geométrica dos dispositivos entre o início do processo de avaliação e após os 1000 ciclos de reposicionamento. Tal comparação reforça a hipótese do maior esforço das esferas metálicas da base do dispositivo (coordenada z, referência primária).

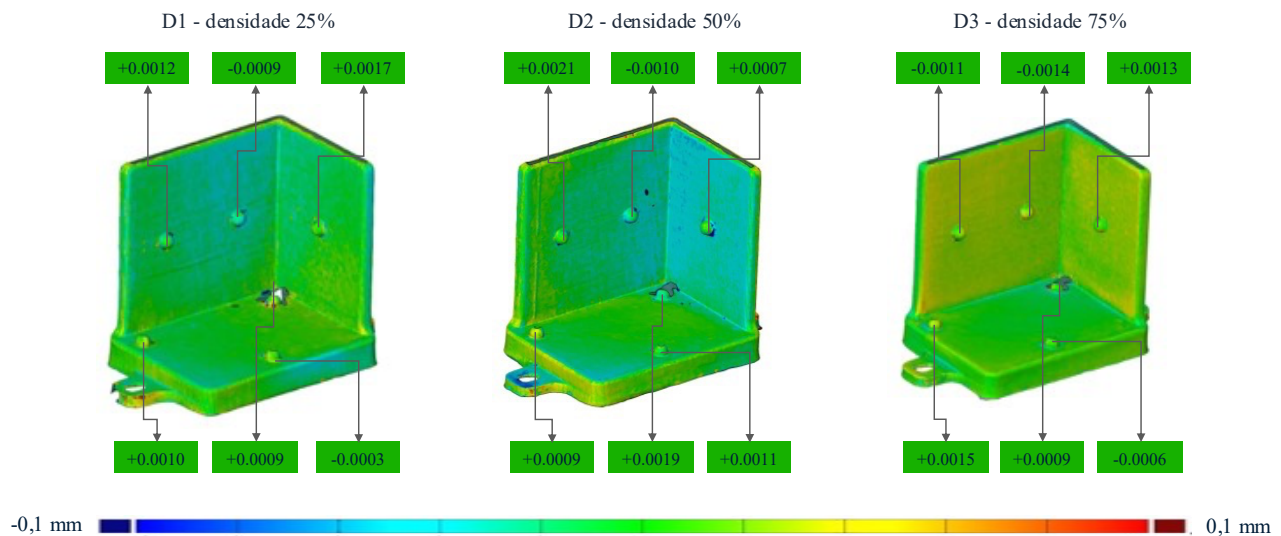


Figura 10. Variação geométrica (antes e pós estudo) para as três densidades estudadas

4. CONCLUSÃO

Através deste estudo foi possível identificar que os três dispositivos estudados mostraram boa estabilidade a longo prazo, entretanto, ficou evidenciada maior amplitude dos resultados, conforme Fig. 4 a 7, inversamente proporcional à densidade dos dispositivos, ou seja, quanto maior a densidade, menores as variações entre os resultados.

Já quando comparados com a tolerância do processo, considerando a regra de ouro da metrologia (a variação do processo não deve ser maior do que um décimo da faixa de tolerância da dimensão avaliada, segundo Albertazzi e Souza (2018)), somente o dispositivo com densidade 75% (D3) mostrou boa capacidade para aplicabilidade no processo de controle dimensional. Dessa forma, define-se que para futuras aplicações, somente dispositivos com densidade maior ou igual a 75% possam ser utilizados nos processos do Grupo Boticário.

Apesar da resistência dos dispositivos poliméricos serem menos resistentes, constatou-se por esse estudo que há aplicabilidade no processo de controle dimensional e que podem trazer benefícios como: baixo custo, baixo tempo de fabricação, possibilidade de utilização de materiais biodegradáveis e compostáveis.

Além disso, foram identificados pontos de atenção na utilização desses dispositivos e que há possibilidades de novos estudos relacionados a: variação dimensional do processo de impressão por modelagem por deposição fundida (FDM) conforme evidenciado por Akbaş, Hıra, Hervan, Samankan e Altınkaynak (2019) e relação entre deformação e massa da amostra, além da utilização de outros materiais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Grupo Boticário pela oportunidade de desenvolvimento e pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- ABIHPEC (Associação Brasileira de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos). *Panorama do setor 2023*. São Paulo, 2023. 22 slides, color, 21 x 297. Disponível em: <https://abihpec.org.br/publicacao/panorama-do-setor/>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- AKBAŞ, Oğuzhan Emre; HİRA, Onur; HERVAN, Sahar Zhiani; SAMANKAN, Shahrad; ALTİNKAYNAK, Atakan. Dimensional accuracy of FDM-printed polymer parts. *Rapid Prototyping Journal*, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 288-298, 3 out. 2019. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-04-2019-0115>.
- ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto De. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 2. ed. Barueri: Editora Manole, 2018. 462 p.
- CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH (Alemanha). *Messstrategien Cookbook taktil: für die taktile koordinatenmesstechnik*. Oberkochen, 2014. 98 p.
- CHRYSLER GROUP; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS CORP. *Measurement System Analysis: Reference Manual*. 4. ed. Estados Unidos: 2010.
- LI, Feng; STODDART, David; ZWIERZAK, Iwona. A Performance Test for a Fringe Projection Scanner in Various Ambient Light Conditions. *Procedia Cirp*, [S.L.], v. 62, p. 400-404, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.080>.

- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 7. ed. -: Ltc, 2021. 416 p.
- TEIXEIRA, Stefanie; EBLAGON, Katarzyna M; MIRANDA, Filipa; PEREIRA, M. Fernando R.; FIGUEIREDO, José Luis. Towards Controlled Degradation of Poly(lactic) Acid in Technical Applications. *C*, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 42, 30 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/c7020042>.
- WHEELER, Donald J. *Advanced Topics in Statistical Process Control: the power of shewhart's charts*. Estados Unidos: Spc Press, 1995. 470 p.
- WHEELER, Donald J.; LYDAY, Richard W. *Evaluating the Measurement Process*. 2. ed. Estados Unidos: Spc Press, 1989. 144 p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão do Grupo Boticário.