

Análise de Erros Dimensionais em Robôs Manipuladores Impressos em 3D

João Vítor Franke Goetz, joao.vfg@grad.ufsc.br¹

Roberto Simoni, roberto.simoni@ufsc.br¹

Elison Maiko Oliveira de Souza, elison.maiko@gmail.com¹

Wagner Maurício Pachekoski, wagner.pachekoski@ufsc.br¹

Luan Meneghini, luanmeneghini3@gmail.com²

Henrique Simas, henrique.simas@ufsc.br²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,

²Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis,

Resumo. O avanço de técnicas que facilitaram a fabricação e a prototipação por meio de Manufatura Aditiva, trouxeram novos conceitos aplicados em várias áreas, no escopo robótica nunca antes produziram-se tantos protótipos de robôs. Por meio da popularização e facilitação de acesso a métodos como a Fabricação por Filamento Fundido (FFF) ou a estereolitografia (SLA), modelar um conceito e construir uma ideia tornou-se prático e rápido, entretanto pouco leva-se em conta a usabilidade e qualidade destes protótipos. Afim de avaliar sua precisão, foi realizada uma revisão sobre a principal causa de erros geométricos nas peças impressas em 3D. Um modelo de referência, impresso em 3D com os materiais mais acessíveis (PLA e Resina Standart) nos métodos mais usuais (FFF e SLA) foi utilizado para avaliação de erros de impressão. Com as variações devidamente avaliadas e analisadas, tais foram simulados na linguagem Python utilizando a convenção de Denavit-Hartenberg para cinemática direta de robôs manipuladores. O impacto na precisão do robô manipulador foi analisado para a posição do efetuator final. O resultado observado demonstra que mesmo com desvio dimensional, os robôs manipuladores obtidos por impressão 3D podem ser utilizados em muitas aplicações práticas que não requerem alta precisão.

Palavras chave: Erros Geométricos. Manufatura Aditiva. Convenção Denavit-Hartenberg. Simulação

Abstract. The advancement of techniques that have facilitated manufacturing and prototyping through Additive Manufacturing has brought new concepts applied in various fields. In the scope of robotics, never before has so much been produced, thanks to the popularization and increased accessibility of methods such as Fused Filament Fabrication (FFF) and Stereolithography (SLA). Modeling a concept and building an idea has become practical and fast; however, little consideration is given to the usability and quality of these prototypes. To assess their accuracy, we conducted a review of the main causes of geometric errors in parts after fabrication, verifying them based on a reference model 3D-printed with the most accessible materials (PLA and Standard Resin) using the most common methods (FFF and SLA). With the variations properly evaluated and analyzed, the errors were calculated and simulated in the Python language using the Denavit-Hartenberg convention for the forward kinematics of robotic manipulators, analyzing their impact on position and orientation, and comparing the prediction without errors to the one with errors. In this way, we concluded that manipulators, even with dimensional deviations, can be used in many practical applications without significant losses.

Keywords: Additive Manufacturing, Geometric Errors, Denavit-Hartenberg Convention, Simulation

1. INTRODUÇÃO

A facilidade de fabricação e o baixo custo de criação de robôs manipuladores impulsionada pelos avanços tecnológicos vem os tornando cada vez mais comuns e acessíveis principalmente em ambientes acadêmicos. Robôs manipuladores fabricados por impressoras 3D já são realidade em muitos laboratórios para fins didáticos e para realização de tarefas específicas.

Embora a acessibilidade seja uma vantagem significativa, a precisão dos robôs manipuladores de baixo custo pode ser um ponto crítico, especialmente em aplicações que exigem repetibilidade e confiabilidade, como experimentos científicos ou simulações industriais.

Como a principal causa de erros geométricos em manipuladores de poucos graus de liberdade está diretamente relacionada a seu processo de fabricação é necessário avaliar seus impactos na precisão dos robôs manipuladores.

Desenvolvida sob o conceito de prototipagem rápida a Manufatura Aditiva (MA), surgiu na década de 1980 sob o método de Estereolitografia (SLA) ainda muito comum e usado hoje em dia, trazendo a possibilidade de fabricação de um modelo físico feita a partir de um modelo digital Wong and Hernandez (2012).

Frequentemente associada como 'Impressão 3D', a Manufatura Aditiva (MA) representa o auge do desenvolvimento

industrial recente, permitindo a fabricação de modelos complexos e completamente digitais. Esta tecnologia é primeiramente baseada na prototipagem rápida, fundamentando-se em um método eficiente de conscientização, precisão, planejamento e validação. Logo evoluindo para manufatura rápida, conceitualmente alterando a forma como os produtos são idealizados, testados e produzidos. A evolução desse processo nos leva à fabricação de peças finais funcionais, atendendo às demandas de personalização e redução de tempo Clarissa *et al.* (2022); Kanishka and Acherjee (2023); Chua *et al.* (1998).

A Impressão 3D, é realizada por meio de diferentes métodos tais como sinterização a laser e deposição de material por jateamento, todavia processos custosos e complexos para a aplicação não industrial. Outrossim, métodos como a Estereolitografia (SLA), definida pela solidificação em camadas de um polímero plástico a partir da aplicação de luz ultra violeta, e Fabricação por Filamento Fundido (FFF), definida pela extrusão de um termo plástico através de um bico aquecido e depositado em camadas sobre uma mesa aquecida, são mais simples e de baixo custo, por sua vez fazendo-os amplamente difusos Wong and Hernandez (2012); Daminabo *et al.* (2020); Singh *et al.* (2020); Clarissa *et al.* (2022).

Como uma tecnologia promissora e usada em diferentes campos, acredita-se que ainda mais impactos positivos serão observados quando mais campos estiverem integrado a 'MA', Clarissa *et al.* (2022); Kanishka and Acherjee (2023). Guiados pela aplicação no campo da robótica onde a precisão é muito importante, avaliou-se a qualidade que pode ser obtida na prototipagem rápida na manufatura rápida, analisando a constituição da manufatura aditiva em seus meios mais comuns e acessíveis ou seja, 'FFF' e 'SLA'.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Método Denavit-Hartenberg

Baseando-se na necessidade de uma descrição detalhada dos mecanismos de pares inferiores—que essencialmente consistem em elos mecânicos conectados por juntas onde ocorre o contato de área entre duas superfícies, conforme discutido por Denavit and Hartenberg (1955)—que são elementos chave na cinemática e amplamente utilizados em sistemas robóticos, surgiu a notação de Denavit-Hartenberg, representados na figura 1 e definidos pelas variáveis $[a, d, \alpha, \theta]$.

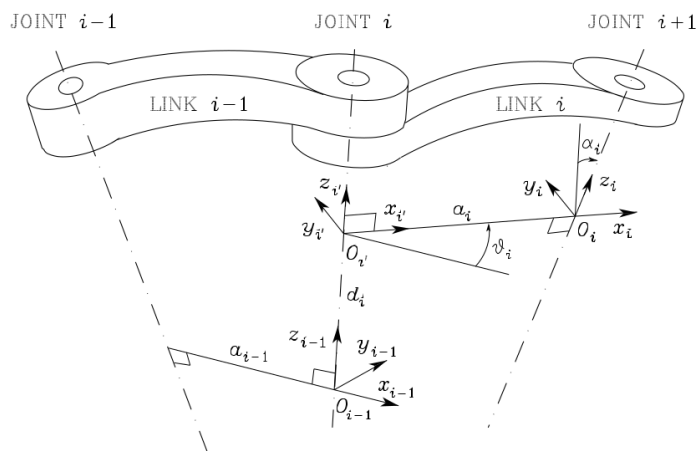


Figura 1. Parâmetros de DH. Fonte Siciliano *et al.* (2010).

Para sua constituição, define-se o eixo Z_i ao longo do eixo da junta $i + 1$, alocando a origem O_i na intersecção do eixo Z_i com a normal comum entre Z_i e Z_{i-1} , atribuindo o eixo X_i em mesmo sentido com direção positiva da junta i para $i + 1$, sem mais o eixo Y_i é construído de forma a completar um quadro destro. Com isto a posição e orientação do quadro i em relação a $i - 1$ torna-se completamente especificada por DH, tal que:

- a_i : Distância entre O_i e O'_i ;
- d_i : Distância ao longo do eixo Z_i ;
- α_i : Ângulo formado entre Z_{i-1} e Z_i sobre eixo X_i , de forma a ser positivo em rotações em sentido anti-horário;
- θ_i : Ângulo formado entre X_{i-1} e X_i sobre o eixo Z_i , de forma a ser positivo em rotações em sentido anti-horário.

Os parâmetros a e α são constantes de projeto e a variação dos demais parâmetros depende do tipo de junta que os conecta, se for revoluta θ é variável porém se a junta for prismática d é a variável, Siciliano *et al.* (2010).

Sua utilização é diretamente aplicada para robôs manipuladores cuja estrutura é formada por uma cadeia cinemática: (1) aberta ou serial quando os elos estão conectados em dois finais, sendo um deles um efetuador final que permite a manipulação de objetos no espaço (2) fechada quando seus elos são ligados em paralelo Siciliano *et al.* (2010).

Sua aplicação direcionada a cinemática direta por meio dos parâmetros estabelecidos fornece como resultado a posição do efetuador final. Todavia é possível resolver a cinemática inversa, onde a partir da posição do efetuador final, torna-se possível estabelecer as variáveis de junta. No entanto, neste artigo somente a cinemática direta será utilizada para avaliar os erros de posição dos robô manipulador.

Segundo Siciliano *et al.* (2010), a matriz da Equação 1 consiste de uma transformação homogênea de coordenadas de cada junta do mecanismo em relação a junta imediatamente anterior

$$\mathbf{A}_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Com a concatenação de matrizes homogêneas é possível calcular a cinemática direta para posição e orientação do efetuador final conforme Equação 2

$$\mathbf{T}_n^o(q_i) = \prod_{i=1}^n \mathbf{A}_i^{i-1}(q_i). \quad (2)$$

2.2 Erros Geométricos

Em protótipos de robôs manipuladores de baixa mobilidade, ou seja, menos de 6 graus de liberdade (6-DOF), onde a compensação de erros geométricos geralmente não é viável por meio de calibração ou métodos de controle se faz essencial avaliar esses efeitos durante a fase de projeto Simas and Di Gregorio (2016). Na fase de projeto é possível identificar regiões do espaço de trabalho menos afetadas por erros e determinar as tolerâncias dimensionais necessárias para atender aos requisitos de precisão Di Gregorio *et al.* (2023).

Avaliando a partir da Manufatura Aditiva, os erros geométricos tem causas estabelecidas por uma série de fatores, segundo Tao *et al.* (2021); Kun (2016); Yubo *et al.* (2020); Jadayel and Khameneifar (2020); Lyu and Manoochehri (2019), entre eles:

- características físicas do material utilizado;
- conversão CAD - CAM, sendo esta uma das principais causas de perda de resolução do objeto;
- parâmetros de impressão utilizados, tais como, temperatura de mesa, espessura de camada, velocidade de impressão, exposição ao ambiente, densidade de preenchimento e falta de calibração do equipamento.

As principais consequências são, de modo geral:

- Deformação Térmica (Warping) caracterizada pela curvatura ou empenamento de peças devido à contração irregular do material durante o resfriamento. Sua origem está nas propriedades térmicas dos polímeros e na falta de controle uniforme de temperatura na plataforma de construção ou retirada da peça.
- Anisotropia, ou seja, a variação nas propriedades mecânicas das peças dependendo da direção analisada.
- Desvio Dimensional originado no encolhimento causado pela contração do material durante o resfriamento.

No modelo FFF, observa-se o efeito de "stair-stepping", caracterizado pelo acabamento escalonado em superfícies curvas ou inclinadas. Isso ocorre devido à deposição em camadas discretas e à resolução limitada, determinada pela espessura da camada, que impede transições suaves. Além disso, há deformações em cantos e bordas, que tendem a se levantar da plataforma, especialmente em impressões longas, devido ao resfriamento desigual Kun (2016); Yubo *et al.* (2020); Mendenhall and Eslami (2023); Lyu and Manoochehri (2019); Jadayel and Khameneifar (2020). Todos estes fatores provocam variações geométricas nas peças impressas.

A compensação das variações geométricas nas peças impressas pode ser feita na cinemática direta. Para manter a precisão do efetuador final, parâmetros geométricos afetados pelas variações geométricas das peças são incluídos no modelo. Seja $\sigma, \epsilon, \beta, \phi$, em que:

- $a_i = a_0 \pm \sigma$, onde σ é o erro geométrico na distância entre O_i e O'_i ;
- $d_i = d_0 \pm \epsilon$, onde ϵ é o erro geométrico na distância ao longo do eixo Z_i ;

- $\alpha_i = \alpha_i \pm \beta$, onde β é o erro geométrico no ângulo formado entre Z_{i-1} e Z_i sobre eixo X_i , sendo este um erro de folga com deslocamento do eixo;
- $\theta_i = \theta_i \pm \phi$, onde ϕ é o erro geométrico no ângulo formado entre X_{i-1} e X_i sobre o eixo Z_i , de forma a ser positivo em rotações em sentido anti-horário.

Afim de modelar tais variações geométricas nas peças impressas obtidos em Impressão 3D, desenvolveu-se um elo como modelo de referência composto de um sólido retangular de comprimento 100mm, largura 20mm, e espessura de 10mm com dois furos circulares com diâmetro de 10mm com centros separados por 80mm conforme Figura 2.

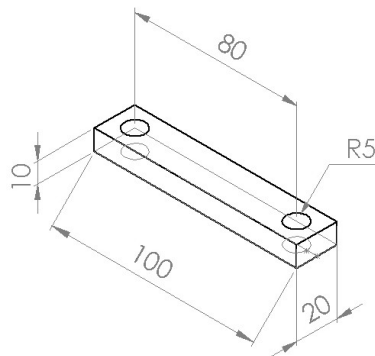


Figura 2. Modelo de elo referência (mm). Autoria própria 2025

Este modelo foi impresso utilizando os métodos SLA e FFF, ou seja, os mais difundidos e acessíveis, os materiais utilizados foram de tal modo, os de comum acesso. Para o método de FFF, foi utilizado uma impressora Creality de modelo Ender-3 Pro devidamente calibrada e ácido polilático (PLA). Para o método SLA, utilizou-se uma impressora Anycubic Photon Mono M5s, também devidamente calibrada e resina standart. Quatro amostras foram impressas para cada método e todas elas passaram pelos mesmos modelos de avaliação geométrica, sendo mensurados manualmente com auxílio de um paquímetro Digimess, modelo 100.170 com resolução de 0,01mm (ver Figura 3 a), e digitalmente por meio de um scan Creality, modelo CR Scan – Lizard (ver Figura 3 b).



Figura 3. Avaliação do modelo: a) Paquímetro (b) Escâner. Autoria Própria, 2025.

As medidas avaliadas foram distância entre centros (DC), diâmetros (D_i) e espessura (η) utilizados para avaliação dos parâmetros DH, conforme observado na Tabela 1. Os erros médio, obtido a partir da variação media de erro obtida entre o escâner e o paquímetro entre as oito amostras impressas, e percentual dada pela sua relação com os valor de referência do projeto, mostram uma boa aproximação do que espera-se ser o erro real Barbetta *et al.* (2004).

Tabela 1. Resultados de erro das medições médio entre paquímetro e escâner. Autoria própria 2025.

	DC	D_1	η
Projeto (mm)	80	10	10
Erro (mm)	1,0247	0,3750	0,3606
Erro (%)	0,0128%	0,0375%	0,0361%

Com os equipamentos disponíveis não foi possível avaliar erros como o deslocamento de centro dos furos do elo de referência. A variação de α (β) foi aproximada a partir da Figura 4, de modo que E é a espessura do elo (η_0) somado com

o erro de impressão (ϵ), r_0 é o raio de furo projetado, r_1 é o raio com erro após a impressão. Pela geometria, utilizando a tangente do triângulo retângulo inscrito nas variações dos raios, obtém-se diretamente a variação desejada, i.e.,

$$\beta = \arctan\left(\frac{r_{i-1} - r_i}{E}\right) \quad (3)$$

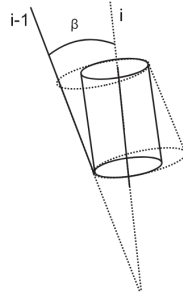


Figura 4. Aproximação para o erro de β para a junta rotativa. Autoria Própria, 2025.

A variação dimensional dos erros pode ser dada a partir da relação descrita na Equação 4. Podemos considerar diferentes dimensões de elos para cálculo e avaliar diferentes variações de respectivos erros, tal que o Erro relacional (E_r) é equivalente a Dimensão relacional (D_r) que multiplica o Erro inicial (E_0), sobre a Dimensão Inicial (D_0).

$$\mathbf{E}_r = \frac{D_r \times E_0}{D_0} \quad (4)$$

Afim de facilitar a análise dos erros de orientação, os ângulos de Euler, Roll–Pitch–Yaw, obtidos por meio da matriz rotação orientação 3×3 inscrita na Equação 2 serão calculados, respectivamente, por (Siciliano *et al.*, 2010):

$$\Phi = \arctan 2(-r_{32}, r_{33}) \quad \Theta = \arctan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}); \quad \Psi = \arctan 2(r_{21}, r_{11}) \quad (5)$$

onde r_{ij} são as entradas da matriz homogênea da Equação 2.

3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Os erros obtidos a partir da Tabela 1 e dispostos na Tabela 2 são:

- ϵ diretamente obtido pela variação da espessura,
- σ obtido diretamente pela variação da distancia entre os centros e calculado para diferentes comprimentos a partir da equação 4,
- β_i obtidos pela equação 3.

o erro ϕ_i não será considerado neste estudo pois pode estar associado a folgas de engrenamento e outros problemas associados a montagem.

Tabela 2. Erros obtidos para os parâmetros DH. Autoria Própria 2025.

σ (mm)	β (rad)	ϵ (mm)
1,02469	0,0181	0,3606

Afim de avaliar o impacto dos erros geométricos na precisão de robôs manipuladores, foi desenvolvido em linguagem de programação Python disponível em Goetz (2025) a aplicação das Equações 1 e 2. Com o auxílio das bibliotecas Sympy, Numpy e Matplotlib, as operações foram realizadas de modo algébrico, com parâmetros genéricos para cada caso de estudo e comparadas com resultados da literatura a fim de validar a modelagem de DH.

Tabela 3. Parâmetros Denavit-Hartenberg nominais. Autoria Própria 2025.

Junta	a_i (mm)	α_i (rad)	d_i (mm)	θ_i (rad)
1	80,0	00,0	00,0	$\pi/12$
2	60,0	00,0	00,0	$\pi/6$
3	40,0	00,0	00,0	$\pi/4$

3.1 Estudo de caso: Robô Planar 3R

A aplicação foi realizada com o manipulador planar de três juntas rotativas, comumente chamado "3R planar". Os parâmetros Denavit-Hartenberg nominais de projeto são mostrados na Tabela 3.

A matriz 6 apresenta a aplicação do método de Denavit-Hartenberg nominal.

$$\mathbf{T}_1(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1,1818e^{-125} & -1,0000 & 0,0000 & 1,1970e^2 \\ 1,0000 & 1,1818e^{-125} & 0,0000 & 1,0313e^2 \\ 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Os parâmetros Denavit-Hartenberg considerando os erros de impressão apresentados nas Tabelas 1 e 2 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros Denavit-Hartenberg com erro. Autoria Própria 2025.

Junta	a_i (mm)	α_i (rad)	d_i (mm)	θ_i (rad)
1	81,02469	0,0181	0,3606	$\pi/12$
2	60,76852	0,0181	0,3606	$\pi/6$
3	40,51235	0,0181	0,3606	$\pi/4$

A matriz 7 apresenta a aplicação do método de Denavit-Hartenberg aos parâmetros com erros de impressão 3D.

$$\mathbf{T}_1(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1,82796e^{-4} & -9,99367e^{-1} & 3,55743e^{-2} & 1,21250e^2 \\ 9,99542e^{-1} & -8,94461e^{-4} & -3,02637e^{-2} & 1,04412e^2 \\ 3,02763e^{-2} & 3,55635e^{-2} & 9,98909e^{-1} & 2,85801 \\ 0,00000 & 0,00000 & 0,00000 & 1,00000 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O resultado do erro pode ser observado na Figura 5.

O vetor de erro entre posições nominal e com erros, cujo módulo é 3,49425mm, é destacado em verde na Figura 5. O erro de orientação é obtido pelos ângulos de Euler, ver Equações 5, e apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Ângulos de Euler Calculados. Autoria Própria 2025.

Ângulos (rad)	Roll	Pitch	Yaw
Sem erros	1,570796	0,00	0,00
Com erros	1,570613	-0,030281	0,035587

4. DISCUSSÃO

A crescente acessibilidade dos robôs manipuladores fabricados por manufatura aditiva é impulsionada pela redução de custos e avanços tecnológicos, especialmente em ambientes acadêmicos. Contudo, a precisão desses robôs permanece um desafio crítico, particularmente em aplicações que exigem repetibilidade e confiabilidade, como experimentos científicos ou aplicações industriais. Este artigo explora os erros geométricos decorrentes dos processos de manufatura aditiva, com foco nos métodos acessíveis de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) e Estereolitografia (SLA), e incorpora os resultados de um estudo de caso detalhado para avaliar o impacto desses erros na precisão de robôs manipuladores.

No contexto da FFF, os erros dimensionais frequentemente resultam de fatores como a resolução da impressora, a qualidade do filamento e os parâmetros de impressão (como espessura da camada e preenchimento). Além disso, a escolha

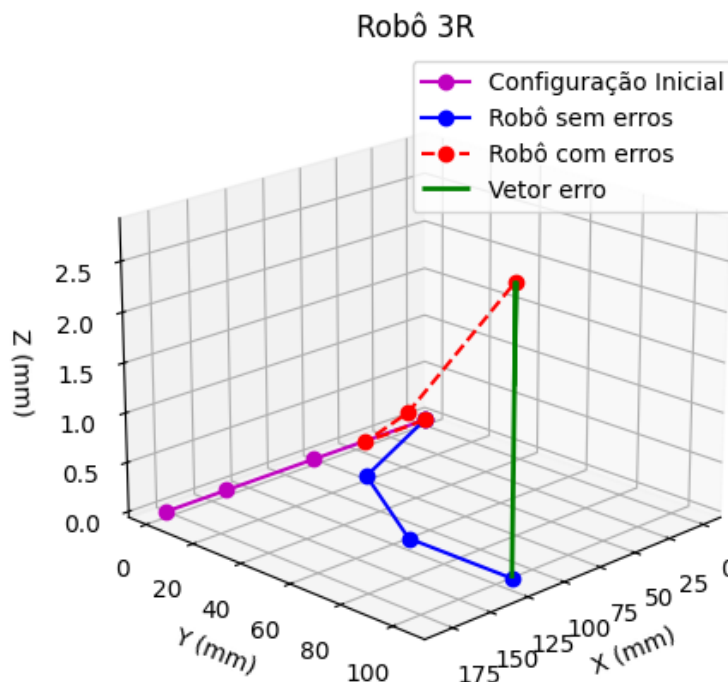


Figura 5. 3R Simulado. Autoria Própria 2025

do material também desempenha um papel crucial, o PLA, comumente usado em FFF, apresentam boa estabilidade dimensional, mas baixa resistência mecânica em comparação com resinas SLA reforçadas. Em robôs manipuladores, onde as peças estão sujeitas a esforços mecânicos repetitivos, a combinação de erros geométricos e propriedades mecânicas inadequadas pode levar a falhas prematuras ou perda de precisão ao longo do tempo.

Embora não seja o foco principal deste trabalho é importante ressaltar que os resultados obtidos na avaliação dos elos amostra indicam que o método de MA mais preciso para desenvolvimento de manipuladores de baixo custo é o FFF. A avaliação percentual média de erro entre paquímetro e scanner é de 5,219% para o SLA e 4,468% para o FFF.

Para avaliar esses impactos, foi realizado um estudo de caso com um robô planar 3R, cujos resultados são apresentados nas tabelas 2 3 4, e nas matrizes de transformação cinemática 6 e 7. Tal que os erros são ϵ : variação na espessura das peças, com valor médio de 0,3606 mm; σ : variação na distância entre centros, com valor médio de 1,02469 mm; β : erro angular, com valor médio de 0,0181 rad. O resultado é um erro de posição de 3,49425 mm.

Os resultados do estudo de caso confirmam que os erros geométricos decorrentes da manufatura aditiva têm um impacto mensurável na precisão de robôs manipuladores. A variação de σ (distância entre centros) foi o principal fonte de erro posicional, enquanto ϵ (espessura) introduziu alterações na geometria que afetaram a planicidade do movimento do robô 3R planar. O erro angular β , embora pequeno, amplificou os desvios ao longo da cadeia cinemática, especialmente em juntas mais distantes da base.

É possível ainda corrigir ou reduzir esse erro uma vez que eles foram mapeados. Esses erros podem ser introduzidos na modelagem para melhorar a precisão de acordo com Simas and Di Gregorio (2016).

Alterando diretamente o processo de fabricação é possível ainda minimizar estes erros. A partir de novas técnicas que vem sendo desenvolvidas para compensar a deformação térmica (Jadayel and Khameneifar, 2020) ou a adoção prática de encapsulamento da impressora no caso de FFF. Para problemas de preenchimento, uma solução que poderia ser adotada é o enchimento ou plastificantes para conter vazios. Ainda, tamanho da camada e a densidade do padrão poderia ser adaptada com o uso de materiais e métodos específicos. É importante enfatizar que o uso de diferentes tipos de manufatura aditiva e materiais trará resultados diferentes e, consequentemente, um impacto difere na precisão geométrica dos robôs manipuladores (Umaras and Tsuzuki, 2017; Tao *et al.*, 2021; Lyu and Manoochehri, 2019).

5. CONCLUSÃO

Os avanços contínuos na manufatura aditiva, incluindo materiais compósitos e impressoras de maior resolução, prometem reduzir os erros geométricos de robôs manipuladores possibilitando aplicações que requerem maior precisão. A integração de inteligência artificial para otimizar processos de impressão e prever erros dimensionais também pode aumentar a precisão das peças. No contexto do estudo de caso, a utilização de simulações computacionais, como as realizadas em Python, destacam o potencial de ferramentas digitais para validar o projeto antes da fabricação, economizando tempo e dinheiro.

Os valores de erro encontrados estão dentro das faixas esperadas para impressoras 3D de baixo custo ($\pm 0,1$ a $\pm 0,5$ mm para FFF). Contudo, a análise quantitativa realizada com o robô 3R destaca que mesmo erros dentro dessas tolerâncias podem comprometer a funcionalidade em aplicações críticas do robô. Uma solução futura será corrigir os erros de impressão via modelagem conforme apresentado em Simas and Di Gregorio (2016).

6. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro do projeto de iniciação científica do João Vítor Franke Goetz.

7. REFERÊNCIAS

- Barbetta, P.A., Reis, M.M. and Bornia, A.C., 2004. *Estatística: para cursos de engenharia e informática*, Vol. 3. Atlas São Paulo, SP.
- Chua, C.K., Chou, S.M., Lin, S.C., Eu, K.H. and Lew, K.F., 1998. "Rapid prototyping assisted surgery planning". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, pp. 624–630.
- Clarissa, W., Chia, C., Zakaria, S. and Evyan, Y., 2022. "Recent advancement in 3-d printing: nanocomposites with added functionality. *prog addit manuf* 7: 325–350".
- Daminabo, S.C., Goel, S., Grammatikos, S.A., Nezhad, H.Y. and Thakur, V.K., 2020. "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3d printing): techniques for polymer material systems". *Materials today chemistry*, Vol. 16, p. 23.
- Denavit, J. and Hartenberg, R.S., 1955. "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices". *American Society of Mechanical Engineers*, pp. 215–221.
- Di Gregorio, R., Simas, H. and Simoni, R., 2023. "A novel method to design translational parallel manipulators with an assigned maximum orientation error". *Journal of Mechanical Design*, Vol. 145, No. 6, p. 9.
- Goetz, J.V.F., 2025. "Desenvolvimento do método denavit-hartenberg em python, em um projeto de análise dimensional e de erros em robôs manipuladores". https://github.com/JvFg92/DH_Aplicacion. Acessado em: 13 mar. 2025.
- Jadayel, M. and Khameneifar, F., 2020. "Improving geometric accuracy of 3d printed parts using 3d metrology feedback and mesh morphing". *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 4, No. 4, p. 15.
- Kanishka, K. and Acherjee, B., 2023. "Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 107, pp. 574–619.
- Kun, K., 2016. "Reconstruction and development of a 3d printer using FDM technology". *Procedia Engineering*, Vol. 149, pp. 203–211.
- Lyu, J. and Manoochchri, S., 2019. "Error modeling and compensation for FDM machines". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1565–1574.
- Mendenhall, R. and Eslami, B., 2023. "Experimental investigation on effect of temperature on FDM 3d printing polymers: ABS, PETG, and PLA". *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 20, p. 13.
- Siciliano, B., Sciacivco, L., Villani, L. and Oriolo, G., 2010. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer Science & Business Media.
- Simas, H. and Di Gregorio, R., 2016. "Geometric error effects on manipulators' positioning precision: a general analysis and evaluation method". *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 8, No. 6, p. 7.
- Singh, S., Singh, G., Prakash, S. and Ramakrishna, S., 2020. "Current status and future directions of fused filament fabrication". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 55, pp. 288–306.
- Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D. and Li, P., 2021. "A review on voids of 3d printed parts by fused filament fabrication". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 15, pp. 4860–4879.
- Umaras, E. and Tsuzuki, M.S., 2017. "Additive manufacturing-considerations on geometric accuracy and factors of influence". *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 50, No. 1, pp. 14940–14945.
- Wong, K.V. and Hernandez, A., 2012. "A review of additive manufacturing". *International scholarly research notices*, Vol. 2012, No. 1, p. 10.
- Yubo, T., Peng, L. and Ling, P., 2020. "Improving tensile properties of polylactic acid parts by adjusting printing parameters of open source 3d printers". *Materials Science*, Vol. 26, No. 1, pp. 83–87.