

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DIMENSIONAL NO PROCESSO DE USINAGEM COM ROBÔ INDUSTRIAL

Anderson de Carvalho Fernandes, anderson.c.fernandes@edu.sc.senai.br¹

Ighor Henrique Ludvig Zafalão, ighorlol1@gmail.com¹

Thiago Rosa Soares, thiago-r-soares@sc.senai.br¹

Bruna Zappelino Camillo, bruna.zappelino@edu.sc.senai.br¹

Andréa Loureiro Andrade, andrea.loureiro@edu.sc.senai.br¹

Doglas Negri, doglas.negri@sc.senai.br²

¹Centro Universitário SENAI/SC – UniSENAI Campus Joinville, R. Arno Waldemar Döhler, 957 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC

²Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, Processamento a Laser e Excelência Operacional, R. Arno Waldemar Döhler, 308 - Santo Antônio, Joinville - SC, 89218-153

Resumo. Este trabalho analisa a precisão dimensional alcançada na usinagem de uma peça teste com o uso de um robô industrial em um ambiente ciberfísico. O experimento foi realizado no Centro Universitário SENAI de Joinville, utilizando um robô KUKA KR70 e uma peça de poliuretano, previamente preparada em fresadora CNC, com geometrias de perfil retangular e chanfro a 45°. A usinagem teve como objetivo avaliar a capacidade do robô em operações de manufatura de precisão, representando as primeiras atividades experimentais conduzidas no novo laboratório do projeto Multicyber, ainda em fase de implantação. As medições dimensionais, realizadas com uma máquina de medição por coordenadas (CMM), revelaram desvios superiores à tolerância estabelecida de $\pm 0,1$ mm. Entre os fatores que contribuíram para as imprecisões observadas destacam-se a ausência de calibração absoluta, a flexibilidade estrutural do sistema robótico e eventuais inadequações na programação dos percursos de usinagem. Os resultados evidenciam os desafios técnicos envolvidos na aplicação de robôs industriais em processos de usinagem de alta precisão, mas também indicam possíveis caminhos de aprimoramento, como a compensação de erros cinemáticos, a implementação de estratégias avançadas de calibração e o refinamento das trajetórias de usinagem. O estudo contribui para a avaliação da viabilidade técnica dessa abordagem e estabelece uma base experimental para futuros avanços no uso de robôs industriais em ambientes de manufatura avançada.

Palavras chave: Robô industrial. Usinagem CNC. Indústria 4.0.

Abstract. This work analyzes the dimensional accuracy achieved in the machining of a test part using an industrial robot in a cyber-physical environment. The experiment was carried out at the SENAI University Center in Joinville, using a KUKA KR70 robot and a polyurethane part, previously prepared on a CNC milling machine, with rectangular profile geometries and 45° chamfer. The machining aimed to evaluate the robot's capacity in precision manufacturing operations. Dimensional measurements were performed with a coordinate measuring machine (CMM), revealing deviations greater than the established tolerance of ± 0.1 mm. Among the factors that contributed to the observed inaccuracies are the lack of absolute calibration, the structural flexibility of the robotic system and possible inadequacies in the programming of the machining paths. The results highlight the technical challenges involved in the application of industrial robots in high-precision machining processes, but also indicate possible paths for improvement, such as the compensation of kinematic errors, the use of advanced calibration strategies and the refinement of machining trajectories.

Keywords: Industrial robot, CNC machining, Industry 4.0

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a automação industrial consolidou-se como um pilar fundamental na modernização dos processos produtivos, promovendo ganhos expressivos em produtividade, qualidade e segurança nas operações de manufatura. Nesse cenário, os robôs industriais assumiram um papel estratégico devido à sua elevada repetibilidade, flexibilidade operacional e capacidade de integração com sistemas digitais e características essenciais para a construção de ambientes ciberfísicos alinhados aos princípios da Indústria 4.0 (GIANNETTI et al., 2023).

Historicamente, os robôs industriais têm sido utilizados em atividades como soldagem, pintura, montagem e movimentação de materiais. Contudo, impulsionados pelos avanços em tecnologias de controle, sensoriamento e *retrofitting*, esses sistemas têm expandido seu campo de aplicação para processos mais complexos e exigentes, como a usinagem CNC (CENA e MELKOTE, 2017). Essa ampliação está associada ao potencial dos robôs em oferecer flexibilidade operacional, capacidade de atuar em geometrias complexas e redução da área ocupada em comparação com centros de usinagem tradicionais.

A aplicação de robôs na usinagem CNC, especialmente em células robotizadas, tem sido estudada como uma alternativa promissora para a fabricação de peças em volumes médios e baixos, cenários em que a adaptabilidade e a redução dos tempos de setup são fatores críticos (BIZZARI et al., 2021). As células de manufatura flexível (FMS – *Flexible Manufacturing Systems*) integram estações automatizadas, interligadas por sistemas de controle coordenado, possibilitando a realização de múltiplas operações de forma eficiente. Nesse contexto, os robôs agregam valor não apenas pela automação das tarefas, mas também pela facilidade de reconfiguração e pela integração com sistemas de monitoramento e controle em tempo real.

Apesar do avanço, a utilização de robôs em operações de usinagem ainda enfrenta desafios importantes, sobretudo relacionados à rigidez estrutural, à vibração durante o corte e à precisão dimensional obtida. A rigidez inferior dos braços robóticos, em comparação aos centros de usinagem convencionais, pode comprometer tanto o acabamento superficial quanto a exatidão geométrica das peças usinadas (CENA e MELKOTE, 2017). Para contornar essas limitações, têm sido propostas abordagens como modelagens dinâmicas mais precisas, estratégias de compensação ativa e o desenvolvimento de sistemas de fixação otimizados (DELAGRACIA et al., 2023).

Ademais, a adoção de tecnologias de controle abertas e personalizáveis, como o LinuxCNC, combinada à criação de gêmeos digitais (Digital Twins), tem impulsionado a modernização de equipamentos antigos e a reintegração de robôs legados em ambientes produtivos digitalizados, oferecendo uma alternativa de menor custo em relação à aquisição de novos sistemas (GIANNETTI et al., 2023).

Considerando os avanços e desafios mencionados, este trabalho propõe investigar a precisão dimensional obtida na usinagem de uma peça teste utilizando um robô industrial. O experimento foi conduzido no âmbito do projeto Multicyber, no Centro Universitário SENAI de Joinville, em um ambiente ciberfísico atualmente em fase de implantação. Essas foram as primeiras usinagens realizadas neste laboratório, o que confere caráter exploratório à investigação. A pesquisa tem como objetivo fornecer dados experimentais que subsidiem a avaliação da viabilidade técnica da usinagem com robôs industriais, contribuindo para a ampliação de seu uso na indústria de manufatura avançada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a validação do estudo, foi selecionada uma peça de teste, ilustrada na Figura 1, contendo dois elementos geométricos principais: um perfil em topo com dimensões de 82 x 15 mm e um chanfro a 45°.

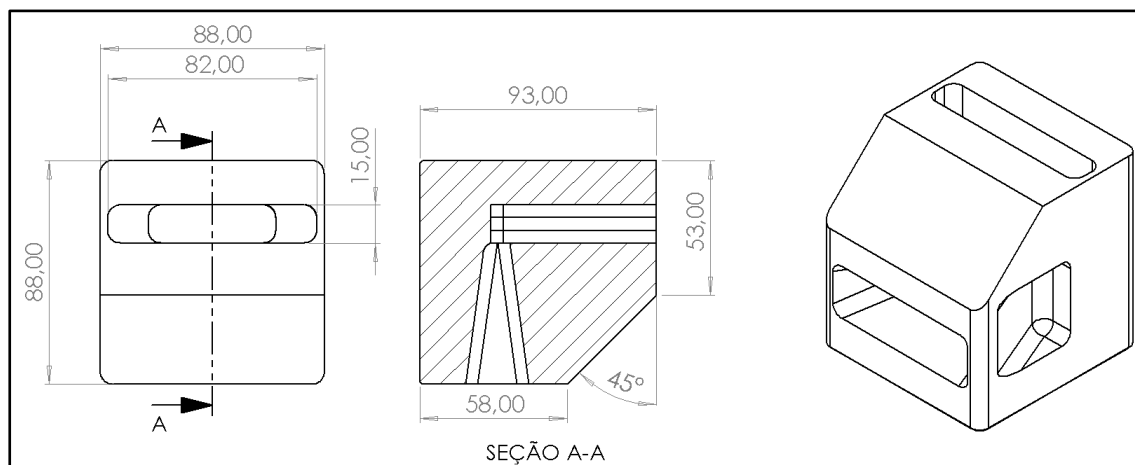


Figura 1. Modelo da peça de teste com perfil retangular e chanfro a 45° utilizado na validação experimental

A peça foi inicialmente preparada em uma fresadora CNC ROMI D600, de três eixos, onde foram usinados o contorno, a altura e um detalhe lateral, deixando os acabamentos finais para a operação realizada pelo robô. A etapa de usinagem com o robô foi conduzida utilizando um robô industrial KUKA KR 70 R2100, equipado com seis eixos, capacidade de carga de 70 kg, alcance de 2100 mm e repetibilidade de $\pm 0,05$ mm. Para a operação, utilizou-se uma fresa de topo de 10 mm de diâmetro com quatro arestas de corte. Após a usinagem, as regiões trabalhadas foram inspecionadas utilizando uma máquina de medição por coordenadas (CMM) Mitutoyo QM Measure 353.

Essa abordagem visa avaliar o desempenho do sistema robótico em operações de usinagem e gerar dados experimentais relevantes para fomentar a integração da robótica industrial com processos de fabricação de alta precisão.

3. RESULTADOS

Para a realização do teste de usinagem com robô industrial, foi utilizado um bloco de resina de poliuretano, material selecionado por suas propriedades adequadas para aplicações de prototipagem e usinagem leve. O bloco foi previamente preparado e fixado conforme mostrado na Figura 2a. Para fins comparativos, foram usinados 3 blocos.

A operação de usinagem foi conduzida com o robô industrial KUKA KR 70, ilustrado na Figura 2b. Este robô, de seis eixos articulados, apresenta alcance e capacidade de carga compatíveis com aplicações experimentais em materiais de baixa rigidez.

A programação dos percursos de usinagem contemplou duas geometrias distintas: a primeira consistiu na execução de um perfil retangular de 82 mm × 15 mm (Figura 2c), e a segunda, na realização de um chanfro a 45° ao longo da borda da peça (Figura 2d). Cada trajetória foi programada com parâmetros específicos de velocidade, avanço e inclinação da ferramenta, com o objetivo de analisar o comportamento do sistema robótico em diferentes condições geométricas de usinagem.

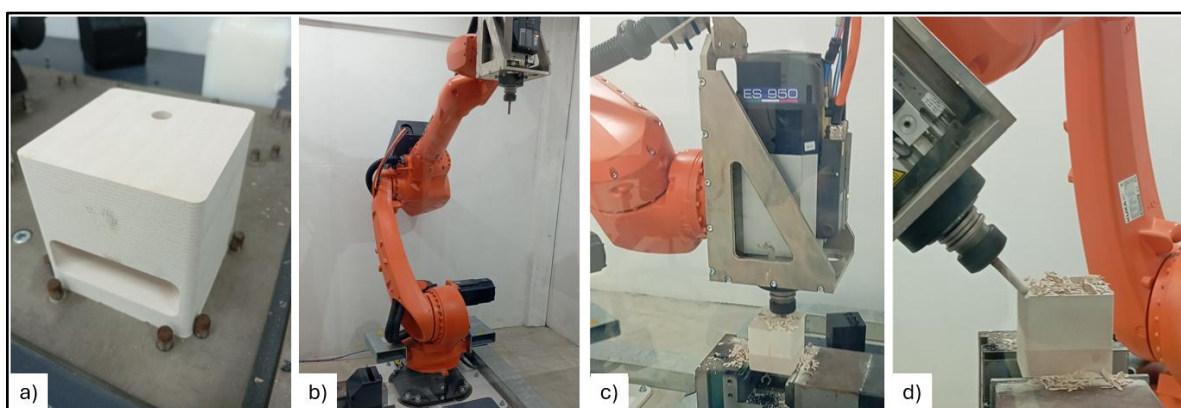


Figura 2. Etapas e configurações do processo de usinagem com robô industrial: (a) bloco de resina pré usinado, (b) robô KUKA KR70, (c) usinagem da geometria retangular, (d) usinagem do chanfro com inclinação de 45°

Após a conclusão do processo de usinagem, as peças foram submetidas a uma medição tridimensional com o objetivo de avaliar suas dimensões e compará-las ao modelo CAD de referência, ilustrado na Figura 1. A inspeção foi realizada utilizando uma máquina de medição por coordenadas (CMM) Mitutoyo QM Measure 353, apresentada na Figura 3, equipada com apalpador de contato. O equipamento dispõe de uma faixa de medição de 300 × 500 × 300 mm nos eixos X, Y e Z e oferece uma precisão de $\pm (2,5 + 5L/1000) \mu\text{m}$, sendo adequado para inspeções de alta precisão em peças com geometrias complexas.



Figura 3. Máquina de medição por coordenadas Mitutoyo QM Measure 353

Para fins de análise comparativa, foi adotada uma tolerância dimensional geral de $\pm 0,1$ mm, valor considerado aceitável para usinagem em materiais como a resina de poliuretano e compatível com os objetivos do experimento. As medidas obtidas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre valores nominais e medidos das dimensões usinadas.

Bloco	Medida de 82 mm	Medida de 15 mm	Chanfro de 45°
1	81,483	14,830	44,520
2	81,545	14,880	45,100
3	81,492	14,815	44,480
Média	81,507	14,842	44,700
Desvio	0,0335	0,0340	0,3470

As medições realizadas com a máquina de medição por coordenadas revelaram desvios dimensionais superiores à tolerância especificada de $\pm 0,1$ mm. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos, destacando-se, por exemplo, uma diferença de $-0,493$ mm em relação à dimensão nominal de 82 mm, cuja média medida foi de 81,507 mm, com um desvio padrão de 0,0335 mm. Para a dimensão de 15 mm, a média registrada foi de 14,842 mm, também inferior à nominal, com um desvio de $-0,158$ mm e um desvio padrão de 0,0340 mm, indicando boa repetibilidade, embora os valores médios estejam abaixo do valor nominal especificado. Já para o chanfro de 45°, a média aferida foi de 44,700 mm, com o maior desvio padrão dentre as medições (0,3470 mm), o que sugere maior variabilidade dimensional neste elemento específico, possivelmente relacionada à dinâmica do processo durante a interpolação angular.

Esses resultados evidenciam discrepâncias significativas em comparação ao modelo CAD de referência, revelando limitações na fidelidade dimensional do processo automatizado de usinagem. Embora o robô industrial empregado apresenta alta repetibilidade, isto é, capacidade de repetir movimentos com consistência, é importante salientar que esse atributo não se traduz automaticamente em precisão absoluta. A precisão, por sua vez, pode ser significativamente afetada por fatores operacionais e estruturais ao longo do processo de fabricação.

Entre as possíveis causas para os desvios observados na usinagem com robôs industriais, destaca-se a ausência de calibração absoluta, que compromete a correspondência entre as posições programadas e as efetivamente alcançadas pelo manipulador. Essa lacuna pode gerar erros sistemáticos de posicionamento, especialmente em trajetórias tridimensionais complexas. Estudos recentes demonstram que a compensação de erros cinemáticos, utilizando técnicas como modelagem geométrica, rastreamento a laser e otimização iterativa de parâmetros, pode melhorar significativamente a precisão absoluta dos manipuladores industriais (CHLADEK et al., 2022; LI et al., 2023). Adicionalmente, estratégias baseadas na análise de sensibilidade dos parâmetros cinemáticos têm se mostrado eficazes na redução de erros de posicionamento e de atitude — este último relacionado à diferença angular entre a orientação real e a programada do efetuador final (LI et al., 2023).

Outro fator crítico está relacionado à flexibilidade estrutural do sistema robótico, que envolve não apenas o braço manipulador, mas também os dispositivos de fixação da ferramenta, como *spindle*, suportes e a própria ferramenta de corte. Essa flexibilidade introduz deformações elásticas locais e globais durante o processo de usinagem, especialmente sob condições de carga dinâmica. Tais deformações afetam a exatidão da trajetória e comprometem a qualidade dimensional final da peça. A magnitude desses desvios depende diretamente da rigidez do conjunto e das forças de corte atuantes, sendo particularmente influenciada por variações de avanço, profundidade de corte e tipo de material trabalhado. Nesse contexto, abordagens integradas de compensação, que consideram tanto a modelagem dinâmica quanto a retroalimentação sensorial, vêm sendo estudadas como forma de mitigar tais efeitos (KONG e YU, 2022).

Adicionalmente, a programação dos percursos de usinagem é um aspecto determinante para a precisão final. Erros na interpolação dos eixos ou na definição das trajetórias podem comprometer a exatidão, especialmente em geometrias complexas. A literatura recomenda a adoção de algoritmos de interpolação otimizados e o refinamento da malha de pontos da trajetória como estratégias eficazes para minimizar essas limitações (LI et al., 2023).

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nas medições realizadas com a máquina de medição por coordenadas evidenciaram desvios dimensionais significativos, excedendo a tolerância estabelecida de $\pm 0,1$ mm, com destaque para um desvio de $-0,493$ mm em relação à dimensão nominal de 82 mm. Essas discrepâncias indicam uma diferença considerável entre a geometria projetada no modelo CAD de referência e a geometria efetivamente produzida, evidenciando a necessidade de aprimoramento da precisão absoluta no sistema de usinagem com robôs industriais. Embora o robô utilizado apresente

elevada repetibilidade, a precisão absoluta mostrou-se sensível a diversos fatores operacionais e estruturais, exigindo controle mais rigoroso.

Entre as principais causas dos desvios observados destacam-se a ausência de calibração absoluta e a flexibilidade estrutural do sistema de usinagem, que afetam diretamente a precisão dimensional. A aplicação de técnicas de calibração cinemática, aliada à compensação de erros de posicionamento e de atitude, configura-se como uma estratégia promissora para aumentar a acurácia do processo. Também se ressalta a importância de considerar os efeitos da flexibilidade do robô e dos dispositivos de fixação, que podem induzir deformações durante a usinagem e comprometer a qualidade final das peças.

É relevante destacar que este estudo representa as primeiras usinagens realizadas no ambiente ciberfísico do projeto Multicyber, ainda em fase de implantação. A ausência de calibrações iniciais e de ajustes finos nos parâmetros operacionais justifica, em parte, os desvios registrados e reforça a importância de etapas sistemáticas de validação do sistema. Diante desse cenário, recomenda-se a implementação de procedimentos de calibração mais robustos, a revisão das estratégias de usinagem e o controle rigoroso das condições estruturais e ambientais. Tais medidas são fundamentais para minimizar as fontes de erro, assegurar a conformidade dimensional dos produtos com as especificações de projeto e consolidar o uso de robôs industriais como alternativa viável na usinagem de precisão em ambientes de manufatura avançada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro concedido para a aquisição de equipamentos, por meio do Edital nº 15/2023. Agradecem também ao Centro Universitário SENAI Santa Catarina – Campus Joinville, pela infraestrutura disponibilizada, incluindo o acesso aos laboratórios e aos equipamentos essenciais para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bizzari, A. F. et al. 2021. *Otimização de produção em uma célula de manufatura flexível por meio de redução de tempo de ciclo*. Joinville: Faculdade de Tecnologia SENAI.
- Cena, L.; Melkote, S. N. 2017. Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling. *Procedia Manufacturing*, v. 10, p. 486–496.
- Chladek, S., Sveda, J., Sika, Z. and Benes, P. 2022. Increase Of Industrial Robot Accuracy Based On Kinematic Errors Compensation. *MM Science Journal*, 2022(5). doi: https://doi.org/10.17973/mmsj.2022_12_2022149.
- Delagrancia, L. et al. 2023. Sistema de troca rápida de ferramentas (SMED): um estudo de caso em processo de usinagem. *RECIMA 21*, v. 4, n. 8, p. 1–10. doi: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i8.3789>.
- Giannetti, G. F. et al. 2023. Proposta de arquitetura de controle de um robô ABB IRB 2000 utilizando LinuxCNC. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF 2023, Brasília, DF. Anais [...]. Brasília: ABCM.
- Kong, L.-B. e Yu, Y. 2022. Precision measurement and compensation of kinematic errors for industrial robots using artifact and machine learning. *Advances in Manufacturing*, 10(3), pp.397–410. doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-022-00400-6>.
- Li, Z., Li, S. e Luo, X. 2023. Efficient Industrial Robot Calibration via a Novel Unscented Kalman Filter-Incorporated Variable Step-Size Levenberg–Marquardt Algorithm. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 72, pp.1–12. doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2023.3265744>.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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