

ANÁLISE COMPARATIVA DA USINAGEM POR FRESAMENTO EM BRAÇOS ROBÓTICOS E CNC DE 5 EIXOS POR SIMULAÇÃO

Ighor Henrique Ludvig Zafalão, ighor_zafalao@estudante.sc.senai.br¹

Anderson de Carvalho Fernandes, ¹ anderson.c.fernandes@edu.sc.senai.br¹

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

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

Álvaro Paz Graziani, alvaro.graziani@edu.sc.senai.br¹

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

¹Centro Universitário SENAI/SC – UniSENAI Campus Joinville, R. Arno Waldemar Dohler, 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: O uso de máquinas CNC para fresamento multieixos de peças complexas é amplamente difundido, mas apresenta desafios relacionados a espaço fabril e altos custos operacionais. Em contrapartida, células de usinagem robótica, que utilizam braços robóticos articulados equipados com fusos de fresagem, oferecem vantagens como maior acessibilidade e menor demanda por espaço. Este estudo realiza uma comparação entre o fresamento realizado por uma fresadora CNC de 5 eixos e um braço robótico, com foco em tempo de usinagem e eficiência operacional. A pesquisa inclui a escolha de um modelo de peça, desenvolvimento de programação para ambos os sistemas, simulação de usinagem em fresadora CNC 5 eixos e braço robótico. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do uso de braços robóticos em usinagem, evidenciando sua eficiência na redução de custos e tempo de ciclo em comparação com a fresadora CNC 5 eixos, especialmente em aplicações que requerem maior flexibilidade e menor setup. Desta forma, este estudo destaca, assim, o potencial da robótica como uma ferramenta estratégica para a indústria, podendo complementar ou até, em determinadas situações, substituir o uso de máquinas CNC.

Palavras-chave: usinagem, fresamento CNC, robótica, simulação CAM.

Abstract. The use of CNC machines for multi-axis milling of complex parts is widespread, but presents challenges related to factory space and high operating costs. In contrast, robotic machining cells, which use articulated robotic arms equipped with milling spindles, offer advantages such as greater accessibility and less space demand. This study compares milling performed by a 5-axis CNC milling machine and a robotic arm, focusing on machining time and operational efficiency. The research includes the selection of a part model, development of programming for both systems, simulation of machining on a 5-axis CNC milling machine and a robotic arm. The results obtained demonstrate the feasibility of using robotic arms in machining, evidencing their efficiency in reducing costs and cycle time compared to the 5-axis CNC milling machine, especially in applications that require greater flexibility and shorter setup. Thus, this study highlights the potential of robotics as a strategic tool for the industry, which can complement or even, in certain situations, replace the use of CNC machines.

Keywords: machining, CNC milling, robotics, CAM simulation.

1. INTRODUÇÃO

A integração de robôs industriais em processos de manufatura tem revolucionado a maneira como produtos são desenvolvidos e fabricados. No contexto do fresamento CNC (Controle Numérico Computadorizado), essa sinergia entre robótica e usinagem de precisão traz benefícios significativos, como maior flexibilidade, redução de custos operacionais e otimização do tempo de produção.

A Indústria 4.0 tem desempenhado um papel vital na busca por maior acessibilidade à usinagem e redução do tempo de preparação das máquinas, a Indústria 4.0 tem desempenhado um papel vital. Essa revolução industrial tem possibilitado novas estratégias de produção e redução de custos, tornando as técnicas de produção inteligentes essenciais para competir no mercado. Minimizar o tempo de inatividade das máquinas e estender a vida útil das ferramentas são fatores cruciais

para a redução dos custos de usinagem (MAITI et al., 2024). Dada a popularidade crescente dos braços robóticos no processo de usinagem e seu custo inferior, torna-se imperativo avaliar sua capacidade (BURKINSHAW et al., 2024).

A usinagem é um processo essencial na fabricação de peças complexas, com as máquinas CNC 5 eixos desempenhando um papel crucial nesse cenário. No entanto, apesar de sua rigidez e precisão, essas máquinas ocupam grandes áreas fabris e acarretam altos custos operacionais (CEN e MELKOTE, 2017). Em contraste, as células de usinagem robótica, compostas por braços robóticos articulados equipados com fusos de fresagem, apresentam vantagens significativas. Em particular, os sistemas de fresagem robótica podem acessar áreas inacessíveis em peças complexas e requerem menos espaço de trabalho (CEN e MELKOTE, 2017).

As fresadoras CNC de 5 eixos têm a vantagem de oferecer maior liberdade de movimento, o que facilita o acesso a locais de difícil alcance e melhora o tempo de setup das peças. Isso ocorre porque, ao rotacionar o eixo, a peça pode ser usinada em diferentes partes sem precisar ser retirada e reposicionada, tornando o processo mais preciso (MIRALLES, 2009). Além disso, os eixos são coordenados pela extremidade da ferramenta de corte, e, durante a rotação, ocorre a compensação da ferramenta para manter o referenciamento correto (MENDES, 2017). A otimização dos caminhos da ferramenta e o uso de sistemas de usinagem virtual são cruciais para melhorar a precisão e eficiência das máquinas CNC de 5 eixos.

A usinagem com máquinas CNC, auxiliada pelas tecnologias CAD/CAM, tem sido fundamental para acompanhar os avanços tecnológicos nas últimas décadas. A usinagem CNC, combinadas com CAD/CAM, são essenciais para responder aos desafios da sociedade moderna (MENDES, 2017). Embora as tecnologias de usinagem tenham evoluído consideravelmente, ainda há áreas que precisam ser exploradas. Com a necessidade de automação, surgiram fresadoras CNC que, inicialmente, operavam sem atuar simultaneamente em seus eixos. Hoje, máquinas com mais de 3 eixos fabricam peças complexas, necessitando de estudos aprofundados em fresamento de múltiplos eixos e robótica aplicada à usinagem.

Os robôs, originalmente criados para diversas funções, têm se desenvolvido muito, especialmente no controle de força de contato com o meio. No entanto, ainda há um longo caminho a percorrer em termos de aplicações que consideram interações significativas do robô (CRUZ, 2010). Tal citação mostra que mesmo os robôs exercendo algumas atividades, ainda foram necessários anos de avanço tecnológico para seu desenvolvimento, sendo visível hoje, um grande avanço desde o ano desta citação. Enquanto no passado os robôs se limitavam a atividades de movimentação de itens e produtos, hoje sua aplicação se estende a trabalhos mais complexos, como os processos de usinagem. A utilização estratégica de *softwares* específicos em conjunto com equipamentos de alto desempenho oferece vantagens como a redução do tempo de usinagem, otimizando operações e setups de máquinas, e a queda de custos, proporcionando uma redução de 43% no tempo de ciclo comparado com o trabalho manual, programação em máquina (DING, 2024).

Este estudo tem como objetivo geral analisar a viabilidade de utilização do robô industrial no processo de fresamento, utilizando de simulação através de *software* CAM. Os parâmetros para tais ferramentas de corte, a serem utilizados, foram calculados com base em catálogos de fornecedores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para tal análise, foi realizada a simulação do processo de usinagem de um bloco de motor utilizando as duas máquinas distintas, avaliando aspectos como eficiência, precisão, estratégias de usinagem, ocorrência de colisões e tempos de execução. O software NX foi empregado para a criação de um modelo 3D detalhado do bloco de motor, projetado com dimensões específicas e elementos geométricos complexos, como ressaltos e diâmetros variados, a fim de testar a capacidade de ajuste e operação das máquinas em múltiplos planos de usinagem. A Figura 1 apresenta as dimensões do bloco de motor desenvolvido.

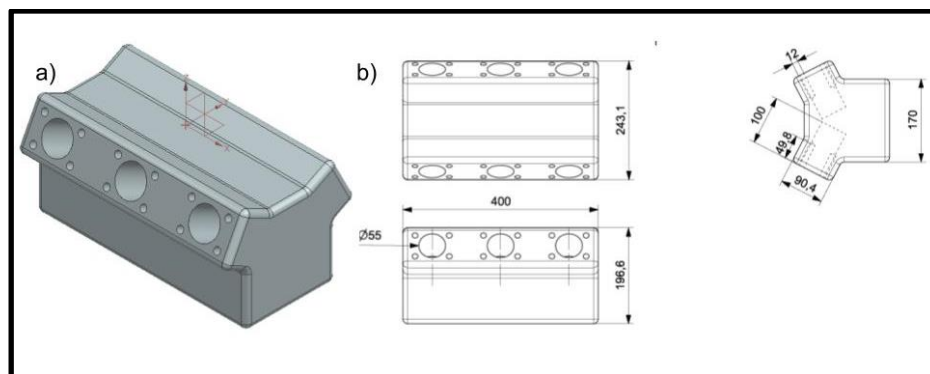


Figura 1. Dimensões do bloco de motor.

O material escolhido foi o Nylon 6.6, devido à sua usinabilidade e resistência, ideal para prototipagem, enquanto o maquinário selecionado incluiu a fresadora CNC DMU 65 Monoblock, conhecida por sua alta precisão e operação em cinco eixos simultâneos, e o robô KR300 R2500, adaptado com um motor *spindle* de 10CV para processos de fresamento. Esses equipamentos foram configurados em dois ambientes de simulação distintos: o campo da fresadora CNC fixou a morsa na mesa giratória, permitindo acesso completo à peça, enquanto o campo do robô contou com uma bancada personalizada para assegurar o alcance de todas as faces da peça, conforme representado na Fig. 2a e Fig. 2b.

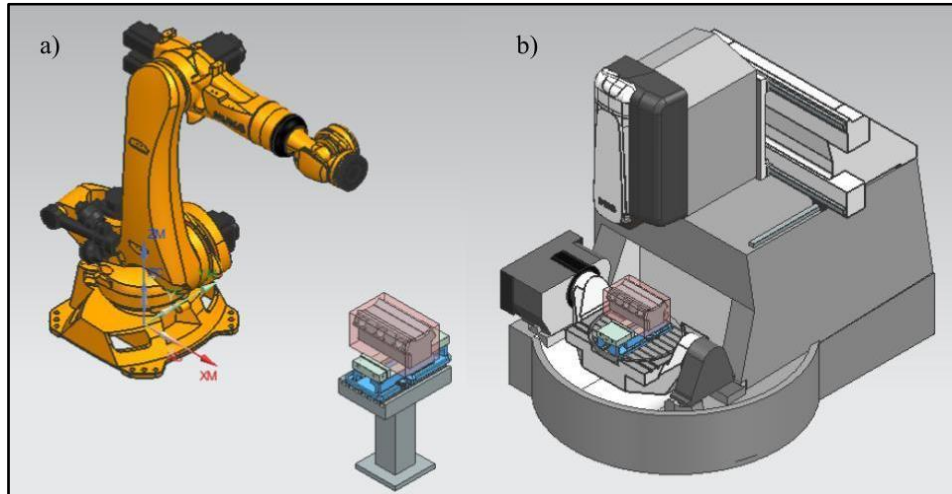


Figura 2. Campos de simulação Robô e Fresadora CNC 5 eixos.

Para ambas as máquinas, a seleção de ferramentas foi guiada pela compatibilidade com seus sistemas de fixação e pela otimização do tempo de usinagem. Enquanto o robô utilizou ferramentas adequadas ao sistema ER32, a fresadora CNC fez uso de ferramentas com fixação HSK-A63/SK40. Estratégias de desbaste e acabamento foram elaboradas utilizando funcionalidades do *software* NX, como “Cavity Mill”, “Area Mill” e “Hole Milling”, com avanços, rotações e incrementos ajustados para cada equipamento. As simulações verificaram a remoção de material, tempos de execução e potenciais colisões. A cinemática do robô foi ajustada manualmente para garantir movimentos precisos e evitar interrupções, como mostrado na Fig. 3, enquanto a fresadora assume automaticamente as posições programadas.

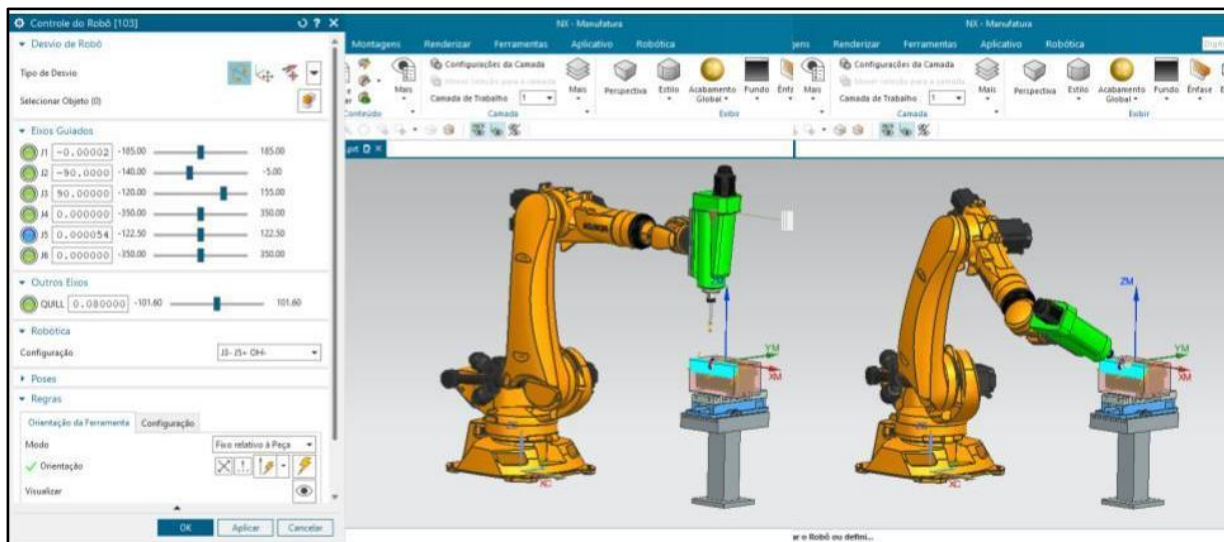


Figura 3. Processo de ajustagem do braço robótico.

A base deste projeto não é avaliar de modo comparativo a usinagem por robô com a usinagem em uma fresadora CNC 5 eixos, mas esta comparação será utilizada para corroborar com a conclusão final, que é discutir a viabilidade de usinagem robótica através da simulação em *software*. Com isso, é elencado alguns parâmetros que serão comparados, sendo eles: quantidade de eixos, dimensional X/Y/Z, precisão, avanço máximo, rotação máxima, limite de diâmetro de ferramenta e tempo de usinagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do campo de simulação de cada equipamento, foi iniciada a criação da programação de usinagem, elencando estratégias e ferramentas adequadas para cada tipo de usinagem. Esse processo ocorreu de maneira simultânea, escolhendo as ferramentas ao mesmo tempo em que se definia os processos de remoção de material, possibilitando uma melhor visualização de como seria efetuado o mover da ferramenta. Com isso, cada meio de simulação apresentou aspectos diferentes, mas utilizando métodos semelhantes, ou seja, houve diferenças em ferramentas e parâmetros, mas as estratégias mantiveram-se similares. Para cada estratégia utilizada na usinagem do material, foi escolhida uma ferramenta que demonstrasse melhor desempenho, tanto em relação à incrementação quanto à agilidade de usinagem. Esse fator orientou o desenvolvimento das estratégias, tendo por início o desbaste e, posteriormente, a usinagem de acabamento. Para ambos os equipamentos, houve o foco em manter as mesmas estratégias, com alterações apenas em ferramentas e parâmetros, buscando aproximar os resultados. As informações fornecidas pelos fabricantes das ferramentas foram determinantes para os cálculos de avanço e rotação.

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (1)$$

$$V_f = n \times z \times F_z \quad (2)$$

Onde:

n = rotação (em RPM)

V_c = velocidade de corte (em m/min)

D = diâmetro da peça ou ferramenta (em mm)

π = constante pi (≈ 3,1416)

O fator 1000 é para converter metros para milímetros.

V_f = avanço de usinagem (mm/min)

z = número de dentes ou arestas de corte da ferramenta

F_z = avanço por dente (mm/dente)

As ferramentas selecionadas foram consultadas no catálogo do fabricante Tungaloy, como mostra o Quadro 8, que inclui dados sobre velocidade de corte, incremento máximo e outros parâmetros importantes.

Quadro 1. Parâmetros de usinagem

Ferramenta	Velocidade de Corte	Incremento máximo (mm)	Avanço por Faca	Número de facas	Avanço	Rotação
Cabeçote Ø50 R6	300	6 mm	0,4	5	3816	1900
Cabeçote Ø32 R0,8	750		0,09	6	4038	7460
Cabeçote Ø25 R0,8				4	3434	9545
Cabeçote Ø20 R0,8				4	4316	11989
Broca Metal Duro Ø12	130	50 mm	0,1	1	689	3445

Na fresadora CNC, a programação contemplou diferentes estratégias, como “Cavity Mill” e “Area Mill”, para desbastes e acabamentos de superfícies e raios, bem como “Hole Milling” e “Deep Hole Drilling” para usinagem de furos e diâmetros. Para o robô industrial, o processo foi similar, mas com ajustes adicionais devido às limitações mecânicas do equipamento. Foi necessário configurar manualmente os planos de usinagem e ajustar os movimentos do braço robótico para evitar colisões ou erros de percurso, o que exigiu uma análise cuidadosa no software de simulação. Os tempos de usinagem foram registrados para ambos os equipamentos, resultando em 0:52:27h na fresadora CNC e 1:09:57h no robô, representando um aumento de aproximadamente 33,3% no tempo de usinagem com o robô, em comparação com a fresadora.

Apesar do tempo superior, o robô demonstrou viabilidade técnica ao concluir o modelo usinado. O processo de desbaste e acabamento é exemplificado na Fig. 4, que evidencia as etapas de remoção de material até a obtenção da peça final.

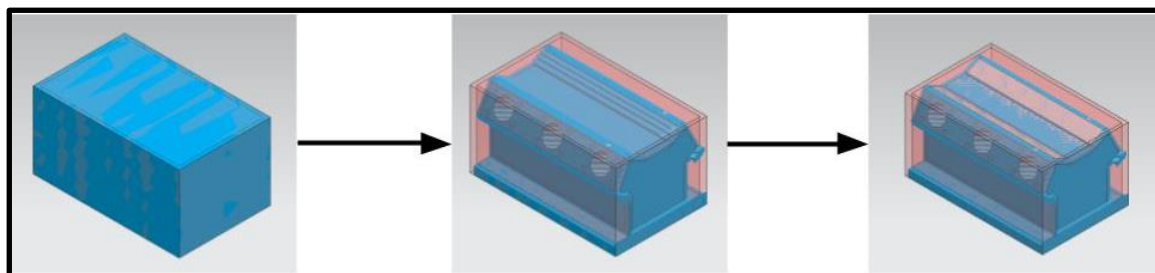


Figura 4. Processo de usinagem da peça.

Um dos desafios encontrados foi a limitação no diâmetro das ferramentas do robô, devido ao uso de um porta-piças ER32, que restringe o diâmetro máximo a 20 mm. Por outro lado, a fresadora CNC, com fixação HSK-A63, permitiu maior flexibilidade na seleção de ferramentas. Por fim, os resultados indicam que, embora o robô não tenha sido projetado originalmente para usinagem, ele pode ser uma alternativa complementar em cenários onde flexibilidade e custo sejam fatores decisivos. O estudo destaca o potencial da robótica industrial como solução para certos tipos de usinagem, desde que sejam realizadas adaptações específicas no equipamento e nas estratégias de programação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou de forma detalhada a utilização de equipamentos para simulação por meio de *softwares* CAM, destacando os principais aspectos de sua aplicação. Por meio deste estudo, verificou-se que, com adaptações específicas, o uso de um braço robótico pode se tornar uma alternativa viável para processos de fresamento. Esse equipamento oferece flexibilidade e inovação em áreas tradicionalmente dominadas por máquinas convencionais. Um dos principais ajustes necessários está relacionado à modificação do flange do *spindle*, que deve ser adaptado para acoplar ferramentas de corte adequadas ao processo. Apesar de o robô não ter sido projetado originalmente para a usinagem, os resultados das simulações realizadas foram promissores. Observou-se a remoção eficiente do material e a formação da peça de acordo com o modelo definido no *software*. Adicionalmente, foram coletadas informações técnicas que ressaltam a funcionalidade e a similaridade de certos componentes do robô em relação às máquinas de fresamento convencionais, reforçando a viabilidade dessa abordagem. Embora o robô ainda apresente limitações em termos de precisão e desempenho, sua aplicação nesse contexto representa uma inovação com potencial para ampliar as possibilidades estratégicas no setor industrial. Isso inclui viabilizar novos serviços e explorar oportunidades de mercado antes inatingíveis. Essa adaptabilidade, aliada à utilização de *softwares* avançados para planejamento e simulação, oferece uma solução moderna e flexível para desafios de manufatura. Como continuidade deste estudo, sugere-se a realização de testes práticos em ambientes laboratoriais, com o objetivo de validar os resultados obtidos nas simulações e expandir as possibilidades de aplicação da robótica na usinagem.

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

- BURKINSHAW, Stephen M. The roles of elevated temperature and carriers in the dyeing of polyester fibres using disperse dyes: part 1 fundamental aspects. *Coloration technology*, v. 140, n. 2, p. 149-207, 2024. <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16906/1/PG_DAELE_2014_2_11.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2024.
- CEN, Lejun; MELKOTE, Shreyes N.. Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling. *Procedia Manufacturing*, [S.L.], v. 10, p. 486-496, 2017. Elsevier BV. <[dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.034](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.034)>.
- CRUZ, Felipe Barreto Campelo. Modelagem, controle e emprego de robôs em processos de usinagem. 2010. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. <<https://core.ac.uk/download/pdf/30375194.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2024.
- DING, Xinlei; QIAO, Jinwei; LIU, Na; YANG, Zhi; ZHANG, Rongmin. Robotic grinding based on point cloud data: developments, applications, challenges, and key technologies. *The International Journal Of Advanced Manufacturing*

Technology, [S.L.], v. 131, n. 7-8, p. 3351-3371, 15 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-024-13094-w>

MAITI, Chayan; PATEL, Deep; MUTHUSWAMY, Sreekumar. Machining Process Automation in Computer Numerical Control Turning Using Robot-Assisted Imaging and CNN-Based Machine Learning. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, [S.L.], v. 146, n. 4, p. 1-12, 26 fev. 2024. ASME International.
<http://dx.doi.org/10.1115/1.4064626>.

MENDES, Adriano Vieira. Caracterização de um Centro de Maquinagem a 5 Eixos e Implementação de um Sistema de Aquisição de Vibração. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2017. <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/18843>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

MACHINING SIMULATION APPLIED TO MILLING WITH ROBOTIC ARMS AND 5-AXIS CNC

Ighor Henrique Ludvig Zafalão, ighor_zafalao@estudante.sc.senai.br¹

Anderson de Carvalho Fernandes, ¹ anderson.c.fernandes@edu.sc.senai.br¹

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

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

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

¹Centro Universitário SENAI/SC – UniSENAI Campus Joinville, R. Arno Waldemar Dohler, 921 - 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

Abstract. *The use of CNC machines for multi-axis milling of complex parts is widely adopted but poses challenges related to floor space requirements and high operational costs. In contrast, robotic machining cells, which utilize articulated robotic arms equipped with milling spindles, offer advantages such as greater accessibility and reduced space demands. This study compares milling performed by a 5-axis CNC machine and a robotic arm, focusing on machining time and operational efficiency. The research involves selecting a part model, developing programming for both systems, and simulating machining processes for the 5-axis CNC machine and the robotic arm. The results demonstrate the feasibility of using robotic arms for machining, highlighting their efficiency in reducing costs and cycle times compared to the 5-axis CNC machine, particularly in applications requiring greater flexibility and reduced setup. Thus, this study underscores the potential of robotics as a strategic tool for the industry, capable of complementing or even, in certain scenarios, replacing CNC machines.*

Keywords: *Machining. CNC Milling Machine. Robotics. Simulation.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.