

TOLERÂNCIA DIMENSIONAL EM USINAGEM ROBÓTICA COM SPINDLE ACOPLADO: ESTUDO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE CAPACIDADE DE PROCESSO

Gabriel Weiber da Silva¹, Rhuan Martinelli Branco¹, Anderson de Carvalho Fernandes^{1*}, Bruna Zappellino Camillo¹

¹Centro Universitário UniSENAI – Joinville/SC

1. Introdução

Com o advento da Indústria 4.0, cresce a demanda por sistemas de manufatura flexíveis, inteligentes e autônomos [1]. Os robôs industriais articulados emergem como alternativa às máquinas CNC convencionais, sobretudo em operações que envolvem geometrias complexas e materiais de baixa rigidez, como espumas e polímeros [2, 3].

Uma célula robótica de usinagem integra um robô industrial, controlador, *spindle* de alta rotação e software CAD/CAM [4]. Em comparação com máquinas convencionais, os manipuladores articulados apresentam menor rigidez estrutural, o que pode gerar desvios dimensionais sistemáticos quando submetidos a esforços de corte [5]. Nesse contexto, torna-se essencial quantificar e compensar esses desvios para viabilizar a tecnologia em cenários produtivos exigentes.

Este trabalho avalia a tolerância dimensional e a capacidade de processo de uma célula robótica experimental composta por um robô KUKA KR 70 R2100 e *spindle* acoplado (Fig.1), usinando corpos de prova em resina de poliuretano (Fig.2) com tolerâncias na faixa de $\pm 0,2$ mm a $\pm 0,3$ mm.



Fig. 1. Robô Industrial KUKA KR 70 R2100

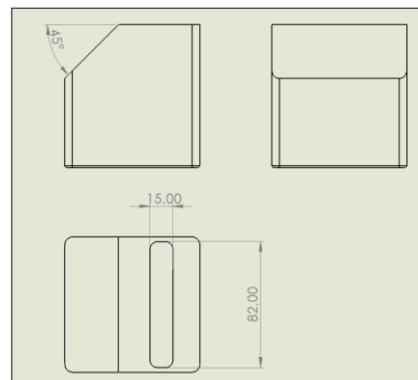


Fig. 2. Desenho 2D do corpo de prova

2. Experimento

Os corpos de prova foram confeccionados em resina de poliuretano, selecionada pelo equilíbrio entre resistência mecânica, estabilidade dimensional e viabilidade econômica. A geometria de referência consistia em perfil retangular de 82 mm \times 15 mm com chanfro a 45°, preparada inicialmente em fresadora CNC e submetida ao acabamento dimensional pela célula robótica.

O robô KUKA KR 70 R2100, de seis eixos, possui capacidade de carga de 70 kg, alcance de 2100 mm e repetibilidade de $\pm 0,05$ mm. Foram usinadas quatro amostras com fresa de topo de 10 mm de diâmetro e quatro arestas de corte. As medições tridimensionais foram realizadas em máquina CMM Mitutoyo QM Measure 353 (precisão $\pm(2,5+5L/1000)$ μ m). As tolerâncias foram definidas conforme ABNT NBR ISO 2768-1, classe média: $\pm 0,2$ mm para a dimensão de 15 mm (Medida A), $\pm 0,3$ mm para 82 mm (Medida B) e $\pm 0,3^\circ$ para 45° (Medida C).

A análise estatística foi conduzida no software Minitab para cada uma das três dimensões avaliadas. Foram calculados os índices CPK (Índice de Capacidade de Processo), que avalia simultaneamente a variação e o desvio de centragem, e PPK (Índice de Desempenho do Processo), que considera a variação total de longo prazo. O offset de compensação foi determinado pela diferença entre o valor nominal especificado e a média amostral ($\text{Offset} = \text{Valor Nominal} - \bar{x}$). Por fim, simulou-se o cenário pós-compensação centrando a distribuição no valor nominal e mantendo o desvio padrão original, isolando o efeito do ajuste sobre a conformidade dimensional.

Para reduzir a variabilidade do sistema de medição, foi realizado estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) comparando dois operadores. O Operador 2 demonstrou menor desvio padrão em todas as dimensões e foi selecionado para a análise de capacidade.

3. Resultados e Discussão

Os resultados iniciais revelaram desvios sistemáticos de centragem (offset) em todas as dimensões avaliadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Índices de capacidade e offsets calculados

Medida	Nominal	Média	CPK inicial	Offset	CPK pós offset
A (mm)	15 ±0,2	15,16	0,47	-0,15	2,17
B (mm)	82 ±0,3	81,46	-2,15	+0,53	2,69
C (°)	45 ±0,3	44,75	0,54	+0,24	2,92

No estado inicial, os índices CPK ficaram abaixo do mínimo recomendado de 1,33 em todas as dimensões, evidenciando processos descentrados. A Medida B apresentou CPK de -2,15, com 100% das peças fora da tolerância. A Medida A obteve CPK de 0,47 e não-conformidade teórica de ~31%, enquanto a Medida C registrou CPK de 0,54 com ~17% de não-conformidade.

Após a aplicação dos offsets de compensação na programação, a simulação pós ajuste indicou salto expressivo nos índices CPK: de 0,47 para 2,17 (Medida A), de -2,15 para 2,69 (Medida B) e de 0,54 para 2,92 (Medida C), atingindo conformidade teórica superior a 95% em todas as dimensões. Esses resultados confirmam que a célula robótica é tecnicamente capaz quando corretamente calibrada.

As conclusões reforçam que o principal desafio da usinagem robótica reside na calibração e compensação rigorosa de erros cinemáticos sistemáticos. Uma vez corrigido o offset, o sistema se estabelece como alternativa técnica e economicamente viável para manufatura de peças em materiais de baixa rigidez com requisitos dimensionais exigentes.

4. Referências

- [1] Liu C.; Xu X. Cyber-Physical Machine Tool – the Era of Machine Tool 4.0. *Procedia CIRP*, v. 63, 2017.
- [2] Iglesias F.; Sebastián M.; Ares E. Overview of the state of robotic machining: current situation and future potential. *MESIC*, 2015.
- [3] Pan Z.; Zhang H. Robotic machining from programming to process control. *Industrial Robot*, v. 35, 2008.
- [4] Cen L.; Melkote S. Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling. *Procedia Manufacturing*, 2017.
- [5] Ballestar M. et al. Impact of robotics on manufacturing: a longitudinal machine learning perspective.