

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA E SEUS EFEITOS NA CONFIABILIDADE DO PROCESSO DE USINAGEM

Leonardo Lourenço de Souza – d2021100960@unifei.edu.br
Juliana Helena Daroz Gaudêncio – juliana.gaudencio@unifei.edu.br
Carlos Eduardo Sanches da Silva – sanches@unifei.edu.br

Palavras-chave: Confiabilidade, Usinagem, Desgaste da ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário altamente competitivo, a análise da confiabilidade é importante para aumentar a qualidade e reduzir os custos com manutenções e substituições de peças e/ou equipamentos. A confiabilidade tem sido reconhecida como uma variável de desempenho há pelo menos 50 anos (Kumar; Singh; Tripathi, 2018), e tem se expandido em diversos ramos e setores, especialmente nos processos de usinagem da indústria. Nesse contexto, a ferramenta de corte é parte integrante das máquinas-ferramentas de usinagem e um dos componentes mais suscetíveis ao desgaste (Wu; Wang; Chen, 2024).

A confiabilidade da ferramenta de corte é definida como a probabilidade de executar sua função sem falhas por um determinado período de tempo, sob condições de usinagem submetidas (Babu; Rao; 2023). Apesar dos avanços nas máquinas-ferramentas, a falha da ferramenta continua a ser um grande desafio, impactando negativamente a confiabilidade, a qualidade do produto, o tempo de produção e os custos associados ao processo (Zaretalab; Sharifi; Taghipour, 2020). Para garantir a qualidade da peça de trabalho e a confiabilidade do sistema de produção, as ferramentas de corte devem ser substituídas antes que ocorra a falha.

Diversos estudos modelam a vida da ferramenta a partir dos parâmetros de corte, mas poucos abordam a variação do desgaste ao longo do processo. Compreender a sua variação é importante, pois a evolução não ocorre de maneira uniforme. Alguns estudos apontam que o desgaste da ferramenta evolui em três estágios (inicial, constante e acelerado), cujo monitoramento é essencial para compreender e prever a sua vida útil (Li, X. *et al.*, 2022; Li, Y. *et al.*, 2022). A análise da curva de desgaste contribui para entender o fenômeno, além de orientar estratégias de manutenção preventiva e modelos de previsão

mais robustos. Assim, o objetivo deste estudo consiste em analisar a variação do desgaste da ferramenta em condições experimentais, buscando compreender seus efeitos na confiabilidade do processo de usinagem.

2. DESENVOLVIMENTO

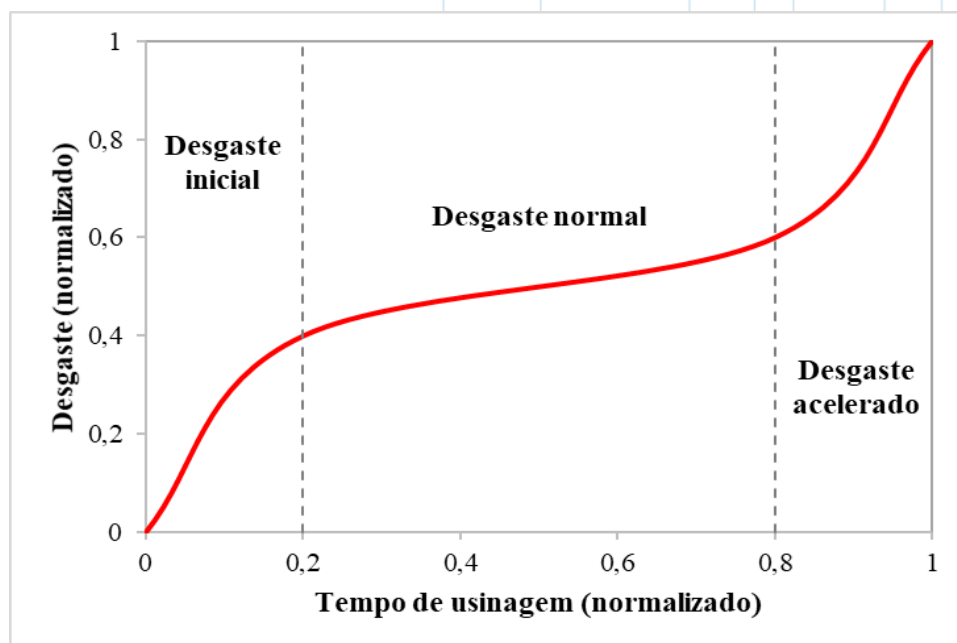
2.1 Referencial teórico

No processo de usinagem, o desgaste é o principal modo de falha em termos de degradação da ferramenta, reduzindo a sua confiabilidade ao longo do tempo. Este fenômeno ocorre devido às interações químicas, térmicas e mecânicas entre a ferramenta e a peça de trabalho (Das; Naikan; Panja, 2025), sendo intensificado pelo atrito gerado quando a ferramenta desliza sobre a superfície da peça de trabalho (Wang *et al.*, 2025). Como consequência, há um aumento das forças de corte, vibrações e da temperatura, comprometendo a qualidade final da superfície usinada (Yang *et al.*, 2024). Esse processo acelera a taxa de desgaste e pode, eventualmente, ocasionar a falha da ferramenta.

Um dos principais tipos de desgaste que determinam o fim da vida útil ou falha da ferramenta é o desgaste de flanco (VB) (Das; Naikan; Panja, 2025). Dessa forma, o tempo necessário para que a largura do desgaste de flanco atinja um valor limite durante a usinagem é utilizado como critério para definir a vida da ferramenta. Atingido esse limite, considera-se que a ferramenta perdeu sua funcionalidade para o processo produtivo, exigindo a sua substituição (Wu; Wang; Chen, 2024). De acordo com a norma ISO 3685:1993, quando o desgaste ultrapassa 0,3 mm, considera-se que a ferramenta ultrapassou sua vida útil, não sendo mais capaz de produzir peças com as dimensões e o acabamento superficial exigidos (Siddhpura; Paurobally, 2013).

Na usinagem, independentemente dos parâmetros de corte, o desgaste da ferramenta apresenta um comportamento não linear que pode ser dividida em três estágios: desgaste inicial, desgaste constante ou normal e desgaste acelerado (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico de variação do desgaste da ferramenta

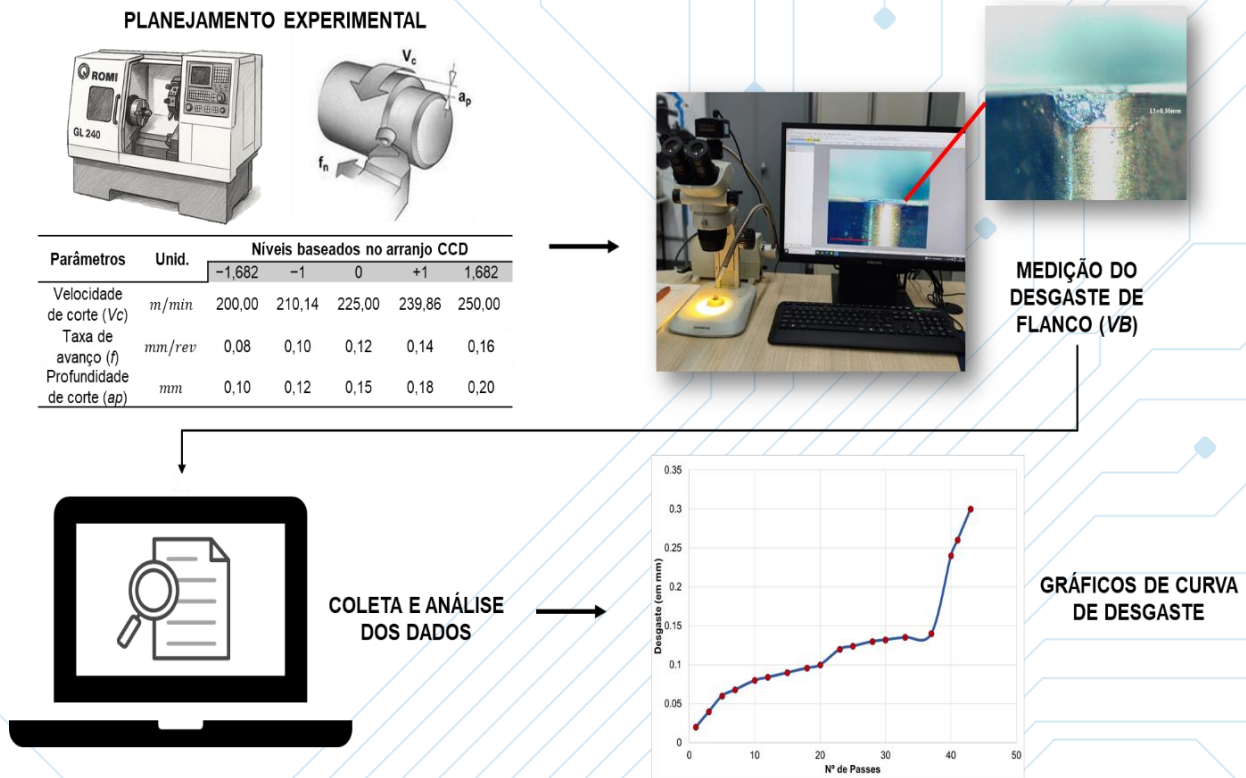


Fonte: Adaptado de Li Y. et al. (2022)

2.2 Metodologia

O estudo foi conduzido por meio de experimentos de usinagem com ferramentas de corte de cerâmica mista com revestimento PVD TiN, em um torno CNC, utilizando o aço endurecido AISI 52100 (Figura 2). Para a definição das condições de corte, utilizou-se um planejamento experimental do tipo *Central Composite Design* (CCD), totalizando 18 ensaios, variando tais parâmetros de entrada: velocidade de corte (V_c), taxa de avanço (f) e profundidade de corte (a_p). As medições do desgaste de flanco foram realizadas em intervalos regulares com auxílio de um microscópio óptico digital, sendo o critério de fim de vida de $VB = 0,3$ mm. Por fim, os dados coletados foram organizados e analisados por meio de gráficos de curva de desgaste.

Figura 2 – Etapas da metodologia

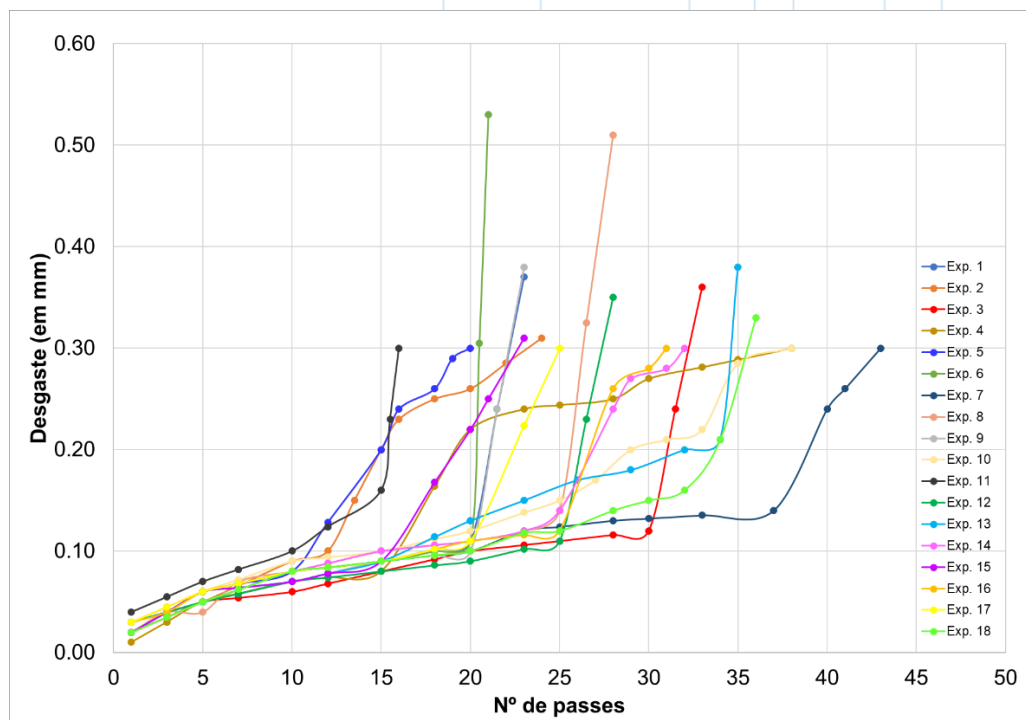


Fonte: Autor (2025)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta as curvas de desgaste da ferramenta em função do número de passes dos 18 experimentos realizados. Observa-se, em geral, que no estágio inicial, a taxa de desgaste da ferramenta é alta devido a aresta de corte ser nova. Em seguida, ocorre o desgaste constante, caracterizado por uma taxa de desgaste mais estável, com o sistema de corte em equilíbrio. Por fim, ao atingir um limite crítico, a aresta perde sua eficiência, intensificando o atrito e o calor na interface ferramenta-cavaco, o que acelera significativamente o desgaste. Essa divisão de estágios é bastante reconhecida na usinagem, sendo que a variação do desgaste ocorre devido às mudanças nas condições mecânicas e térmicas que atuam sobre a ferramenta durante o processo de corte.

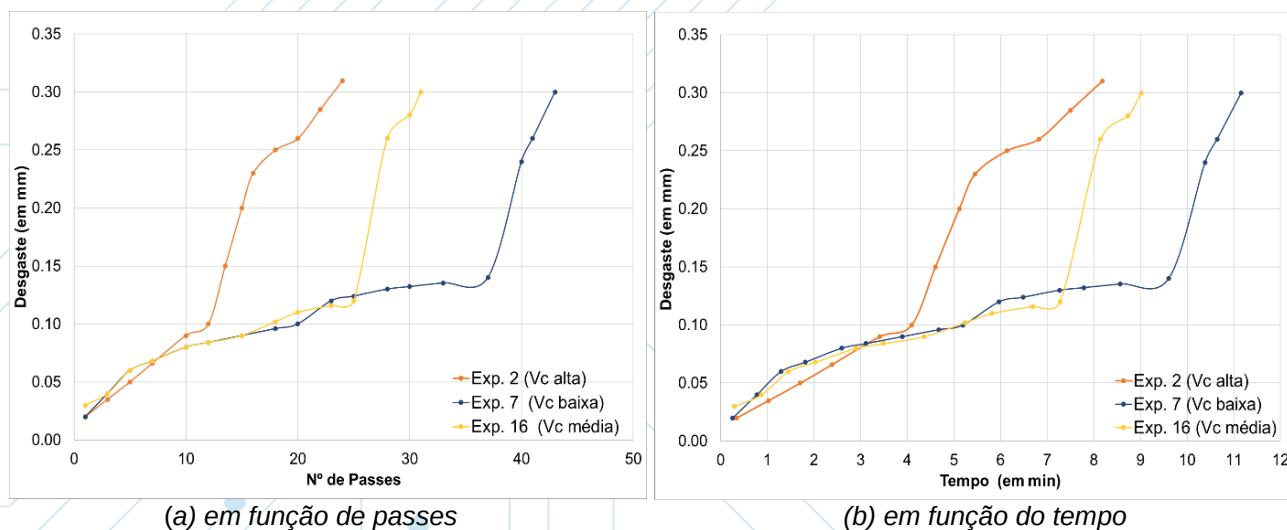
Figura 3 – Curvas de desgaste dos 18 experimentos



Fonte: Autor (2025)

Embora o desgaste siga uma curva típica, essa se torna mais acentuada à medida que a velocidade aumenta (Equeter *et al.*, 2020). A Figura 4 apresenta a evolução do desgaste da ferramenta em três condições representativas de velocidade de corte (alta, média e baixa).

Figura 4 – Curvas de desgaste para três condições de velocidade de corte



Fonte: Autor (2025)

Nota-se que, na condição de velocidade alta, o desgaste atingiu rapidamente o critério de falha (8,2 minutos), refletindo menor vida útil e maior variabilidade do processo. Já em velocidade baixa, a evolução ocorreu de forma mais gradual, prolongando o tempo de usinagem (11,2 minutos). Por fim, a condição de velocidade média apresentou comportamento entre os dois extremos, alcançando o critério de falha em aproximadamente 9 minutos. Esses resultados evidenciam que maiores velocidades de corte reduzem a confiabilidade do processo, enquanto condições mais moderadas favorecem maior previsibilidade e possibilitam melhor planejamento da substituição da ferramenta.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos reforçam a importância de estratégias de manutenção preventiva no processo de usinagem. A análise das curvas de desgaste mostrou que, em condições de alta velocidade de corte, a falha da ferramenta ocorre de forma mais precoce e abrupta, aumentando o risco de paradas não programadas. Por outro lado, em condições mais moderadas, a evolução do desgaste é mais previsível, o que favorece a definição de intervalos de substituição da ferramenta. Nesse sentido, o monitoramento do desgaste e o uso de modelos preditivos permitem programar trocas de ferramentas antes da falha crítica, garantindo maior confiabilidade e reduzindo custos e impactos no tempo de produção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à **UNIFEI, FAPEMIG, CAPES e CNPq** pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BABU, M. S.; RAO, T. B. Real-time cutting tool condition assessment and stochastic tool life predictive models for tool reliability estimation by in-process cutting tool vibration monitoring. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v.17, n.3, p.1237–1253, 2023.
- DAS, M.; NAIKAN, V. N. A.; PANJA, S. C. A review of cutting tool life prediction through flank wear monitoring. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.42, n.2, p.425–473, 2025.
- EQUETER, L. *et al.* An analytic approach to the Cox proportional hazards model for estimating the lifespan of cutting tools. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v.4, n.1, p.27, 2020.

KUMAR, V.; SINGH, L.; TRIPATHI, A. K. Reliability analysis of safety-critical and control systems: A state-of-the-art review. **IET Software**, v.12, n.1, p.1–18, 2018.

LI, X. *et al.* Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.176, p.103882, 2022.

LI, Y. *et al.* A hybrid remaining useful life prediction method for cutting tool considering the wear state. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.121, n.5–6, p.3583–3596, 2022.

SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY, R. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.65, n.1–4, p.371–393, 2013.

WANG, Z. *et al.* An adaptive RUL prediction approach for cutting tools incorporated with interpretability and uncertainty. **Reliability Engineering and System Safety**, v.256, p.110705, 2025.

WU, J.; WANG, J.; CHEN, H. A Method for Predicting Tool Remaining Useful Life: Utilizing BiLSTM Optimized by an Enhanced NGO Algorithm. **Mathematics**, v.12, n.15, p.2404, 2024.

YANG, Q. *et al.* Tool wear and remaining useful life estimation in precision machining using interacting multiple model. **Journal of Manufacturing Systems**, v.74, p.367–386, 2024.

ZARETALAB, A.; SHARIFI, M.; TAGHIPOUR, S. Machining condition-based stochastic modeling of cutting tool's life. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.111, p.3159–3173, 2020.