

# FILTRO DE KALMAN APLICADO À PREDIÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DO INCONEL 718

Luigi Leonardi<sup>1</sup>, Adalto de Farias<sup>2</sup>, Sergio Delijaicov<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI  
2004.luigi@gmail.com; sergiode@fei.edu.br

**Resumo:** Este trabalho visou elaborar um mecanismo de predição do desgaste da ferramenta de corte aplicado ao torneamento do Inconel 718 por meio do filtro de Kalman e validá-lo com base em dados obtidos experimentalmente. Para tal, foram realizados ensaios de usinagem para se obter dados do desgaste da ferramenta para identificação do modelo. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando uma alta correspondência entre o modelo de predição e os dados experimentais. A relação entre força de usinagem e desgaste foi a base para a modelagem e predição.

## 1. Introdução

Este trabalho teve como foco contribuir na predição do desgaste de ferramentas de corte durante o torneamento a seco da liga metálica Inconel 718 por meio da elaboração de um estimador usando o filtro de Kalman. O escopo da pesquisa envolveu a preparação para a usinagem, com a normalização dos corpos de prova e a definição dos parâmetros, sendo a velocidade de corte fixada em 45 m/min, o avanço em 0,05 mm/rot, a profundidade em 0,5 mm e comprimentos usinados de 9 mm. Além disso, foi realizada a coleta dos dados da dimensão do desgaste da ferramenta e das forças envolvidas para cada sessão de usinagem. Por fim, tais dados foram utilizados para projetar o filtro e validar o modelo.

A justificativa do projeto, do ponto de vista industrial, diz respeito à necessidade de se otimizar o processo de remoção de material durante a usinagem, o que implica redução de custos. Tendo em vista tal aspecto, a utilização da mesma ferramenta de corte até seu limite operacional seguro é indispensável. Contudo, o uso indevido da ferramenta pode gerar efeitos indesejados tanto de integridade quanto de acabamento na peça usinada. Dito isso, uma forma de se potencializar o tempo de uso da ferramenta sem comprometer a confiabilidade do processo é garantir a previsibilidade do desgaste e, com isso, maior controle sobre suas implicações.

Partindo de tais premissas, o objetivo final deste trabalho foi fornecer um mecanismo de predição do desgaste da ferramenta de corte, tendo como referência as respectivas forças de corte, por meio da aplicação do filtro de Kalman em um modelo dinâmico visando ao ajuste da predição aos dados experimentais para maior acurácia, com prioridade para os dados finais, que representam os pontos mais próximos da quebra da ferramenta.

## 2. Metodologia

A máquina operatriz utilizada para usinar os corpos de prova foi um torno CNC ROMI E 320. O

procedimento empregado se baseou em realizar uma sessão de usinagem, percorrendo os 9 mm previamente definidos, retirar a pastilha de corte da máquina e medir os valores do desgaste de flanco por meio de um microscópio digital. Também foram coletados os dados das forças de usinagem por meio de um transdutor piezoelétrico, sendo processados pelo devido condicionador de sinais. Tal etapa foi fundamental para se obter as informações necessárias para dar continuidade à elaboração do modelo de desgaste dinâmico. A Figura 1 mostra uma comparação entre o desgaste da mesma pastilha após uma usinagem na máquina e antes da quebra.



Figura 1 – Comparação entre a pastilha após a primeira usinagem e antes da quebra.

Os modelos de desgaste de ferramenta em processos de torneamento duro desempenham um papel importante na previsão da qualidade da superfície. A literatura apresenta modelos analíticos de desgaste baseados em fenômenos de abrasão, adesão e difusão (Singh e Rao, 2010). Os modelos resultantes são dinâmicos e descritos por equações diferenciais de tempo contínuo, cuja variável independente é o comprimento de usinagem que está atrelado ao tempo de usinagem.

O trabalho de Sadhukhana et al. (2021) utiliza um modelo de desgaste do flanco da ferramenta considerando dois fenômenos mais representativos, por meio de um modelo linear aproximado, descrito no espaço de estados. As saídas do modelo são a força total  $F_{out}$  durante a usinagem e o desgaste  $w_f$  devido a abrasão combinada com o de difusão.

$$\dot{w}_{f1} = K_L(w_{f1} - K_w F_{in}) \quad (1)$$

$$\dot{w}_{f2} = K_{w1}(w_{f1} + w_{f2}) + K_{w1}F_{in} \quad (2)$$

e equações de saída:

$$w_f = v \cdot (w_{f1} + w_{f2}) \quad (3)$$

$$F_{out} = K \cdot K_{w1}(w_{f1} + w_{f2}) + F_{in} \quad (4)$$

No presente trabalho, os modelos sugeridos foram adaptados com a inclusão dos ganhos  $v$  e  $K$  para criar mais graus de liberdade na identificação dos parâmetros.

O modelo de tempo contínuo foi discretizado para permitir a utilização de técnicas de predição de tempo discreto. A magnitude da discretização foi imposta igual ao comprimento dos ensaios, ou seja, a cada 9 mm de usinagem. Os parâmetros  $\{K_L, K_w, K_{w1}, v, K\}$  do modelo de discreto foram identificados numericamente por meio da solução de um problema de otimização tipo mínimos quadrados ponderados. A ponderação utilizada priorizou os últimos experimentos de forma que o desgaste final fosse mais bem reproduzido, informação importante para a definição da vida útil da ferramenta. A Figura 2 mostra os resultados obtidos do modelo em comparação com os dados experimentais de desgaste e força de usinagem.

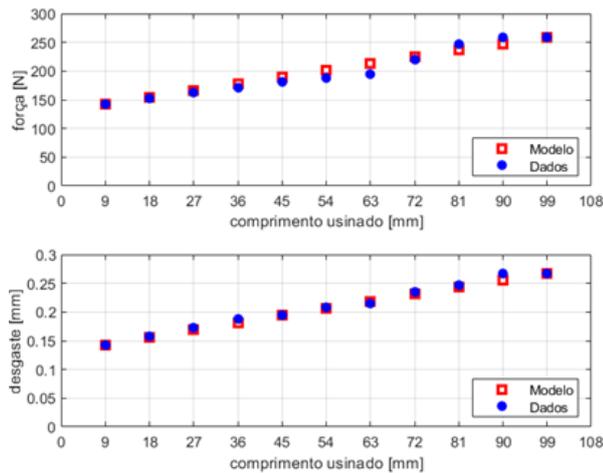


Figura 2 – Pontos obtidos pelo modelo dinâmico em comparação com os dados experimentais.

O modelo com os parâmetros identificados foi utilizado para estimação do desgaste, por meio de um observador de estados tipo filtro de Kalman. A variância do ruído de medida  $R$  e matriz de covariância ruído do processo  $Q$  foram obtidas por meio da solução de um problema de otimização tipo mínimos quadrados ponderados que determinou seus valores ótimos no sentido de produzir estimativas do desgaste mais próximas dos valores experimentais, principalmente nos comprimentos finais.

$$Q = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 \\ 0 & 0,05 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R = 1 \quad (6)$$

### 3. Resultados

O filtro de Kalman foi implementado no ambiente Simulink do Matlab e os resultados obtidos são apresentados na Figura 3, na qual o desgaste é apresentado em função da força de usinagem, visto que é uma informação mais útil para a aplicação. Dessa forma, fica evidente quando a condição do fim da vida útil da ferramenta é atingida. Nota-se que o filtro de Kalman consegue prever de forma aproximada o desgaste experimental, principalmente para desgastes maiores, informação mais expressiva para a decisão de troca.

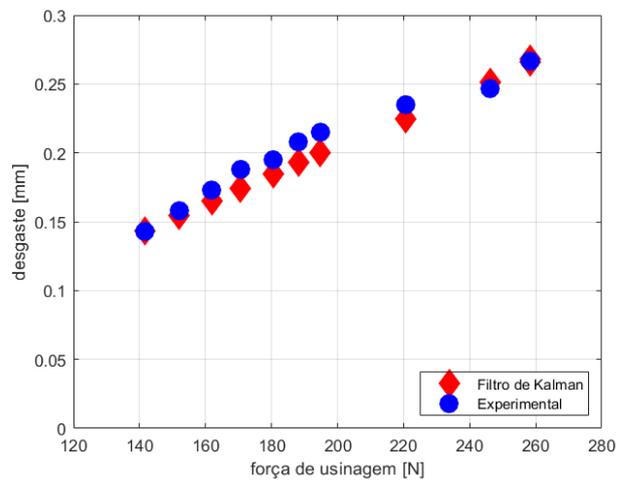


Figura 3 – Resposta do filtro de Kalman em comparação com os dados experimentais.

### 4. Conclusões

Este trabalho utilizou um modelo para a previsão de desgaste de ferramentas em processos de torneamento duro, combinando fenômenos de abrasão e difusão. O modelo dinâmico foi discretizado para permitir a utilização de técnicas de predição em tempo discreto, com uma abordagem que priorizou os últimos ensaios experimentais para melhorar a acurácia na reprodução do desgaste final, fator crucial na determinação da vida útil da ferramenta.

A identificação dos parâmetros foi realizada por meio de um problema de otimização de mínimos quadrados ponderados, resultando em um modelo que mostrou bom ajuste aos dados experimentais. A implementação de um filtro de Kalman para a estimação do desgaste demonstrou ser eficaz, com estimativas próximas aos valores experimentais, especialmente em casos de desgaste mais avançado, que são decisivos para a tomada de decisão quanto à substituição da ferramenta.

### 5. Referências

- [1] Singh, D. & Rao, P. V. Int J Advanced Manufacturing Technology. Flank wear prediction of ceramic tools in hard turning (2010) 50:479–493. DOI 10.1007/s00170-010-2550-5.
- [2] Sadhukhan, C. Mitra, S.K. Biswas, R & Naskar, M. K. Tool condition monitoring: unscented Kalman filter for tool flank wear estimation in turning of Inconel 718. Machining Science and Technology (2021), VOL. 25, NO. 2, 331–348. DOI 10.1080/10910344.2020.1855650

### Agradecimentos

À instituição Centro Universitário FEI pela disponibilização dos recursos e equipamentos necessários para o andamento do trabalho e aos funcionários do CLM pelo suporte e acompanhamento da parte experimental e de coleta de dados.

<sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto PBIC120/23 com vigência de 11/2023 a 10/2024.