

XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Câmpus Itapetininga

ESTIMAÇÃO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DO INCONEL 718

Luigi Leonardi – PIBIC/FEI¹
Prof. Dr. Sergio Delijaicov - FEI²

Resumo: O Inconel 718, liga à base de níquel, é amplamente utilizado nas indústrias aeroespacial, química e petrolífera devido à sua alta resistência mecânica, térmica e química. Porém, sua baixa condutividade térmica dificulta a usinagem, intensificando o desgaste da ferramenta e comprometendo a integridade superficial da peça, especialmente sob condições de fadiga. Tendo em vista tais impactos negativos do ponto de vista industrial, o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo de predição do desgaste da ferramenta de corte por meio do Filtro de Kalman, com a justificativa de que, uma vez que as condições da ferramenta e sua eventual ruptura são conhecidas previamente, é possível determinar o ponto de parada da usinagem antes do desgaste total da ferramenta para que se preserve a integridade superficial do material. Os dados obtidos experimentalmente ao se usar o material em questão em um torno CNC foram utilizados para alimentar o modelo dinâmico escolhido para estimar o desgaste. Os parâmetros das equações diferenciais foram obtidos de maneira numérica pela solução de um problema de otimização de mínimos quadrados ponderados. Após a verificação da acurácia do modelo pela comparação com os dados experimentais, foi aplicado o Filtro de Kalman para minimizar a covariância do erro de estimação do desgaste. O projeto do Filtro de Kalman também levou em consideração a prioridade das últimas sessões de usinagem, visto que este é o momento mais crítico e que poderá levar à quebra da ferramenta. Dessa forma, o filtro atinge sua acurácia máxima nos pontos finais dispostos no gráfico de desgaste pela força de usinagem.

Palavras-chave: Torneamento, Inconel 718, Desgaste de ferramenta, Predição, Filtro de Kalman.

Introdução

Este trabalho teve como foco contribuir na predição do desgaste de ferramentas de corte durante o torneamento da liga metálica Inconel 718 por do 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 (ALTINTAS, 2000), 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, visando elaborar o modelo correspondente.

A justificativa do projeto diz respeito à necessidade de se otimizar o processo de remoção de material durante a usinagem. Tendo em vista tal aspecto, a utilização da mesma

¹Estudante do curso de Engenharia de Automação e Controle, Centro Universitário FEI – São Bernardo do Campo/SP. E-mail: unielleonardi@fei.edu.br. <https://orcid.org/0009-0003-7602-0956>.

²Doutor no Centro Universitário FEI. – São Bernardo do Campo/SP. E-mail: sergiode@fei.edu.br. <https://orcid.org/0000-0001-5621-9536>.

XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Câmpus Itapetininga

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, portanto é essencial garantir a previsibilidade do desgaste. Para tal, este trabalho visou fornecer um mecanismo de predição do desgaste da ferramenta, com base nas 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 (WELCH, 1997).

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 acoplado ao suporte da ferramenta na máquina, sendo processados pelo devido condicionador de sinais. Ao final de cada sessão de usinagem, as forças obtidas eram convertidas automaticamente em uma planilha do Excel, que foi a base para a identificação dos valores das forças a serem utilizados. A Figura 1 mostra uma comparação entre o desgaste da mesma pastilha após uma usinagem na máquina e antes da quebra, para um dos ensaios realizados. Os valores iniciais e finais do desgastes variaram para cada ensaio.

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 relacionado com tempo de usinagem.



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

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.

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

XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Campus Itapetininga

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

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.

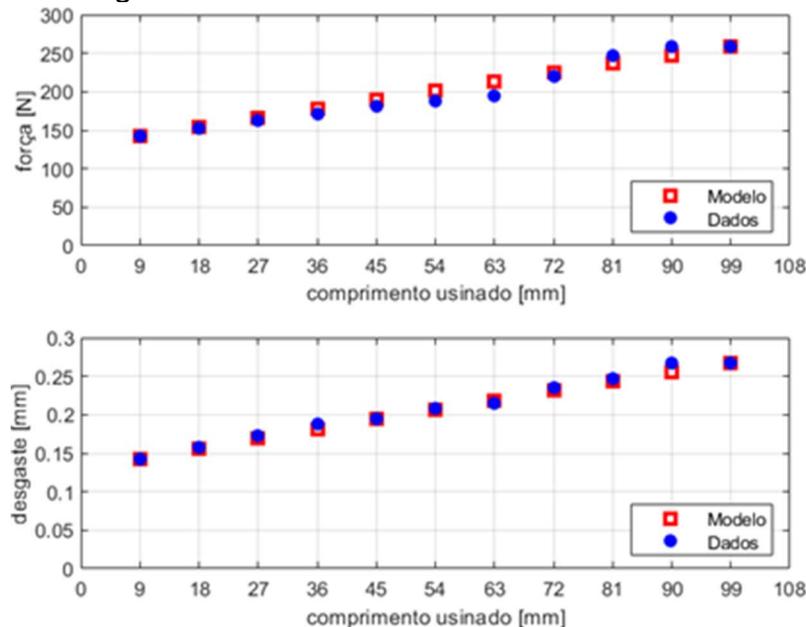


Figura 2 – Pontos obtidos pelo modelo dinâmico em comparação com os dados experimentais.

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 $R = 1$ 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.

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

XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Campus Itapetininga

Resultados

O Filtro de Kalman foi implementado no ambiente Simulink do MATLAB, integrando o modelo dinâmico do desgaste da ferramenta com os dados coletados do processo de usinagem. Os resultados estão apresentados na Figura 3, onde o desgaste é expresso em função da força de usinagem, uma variável que normalmente é facilmente obtida mesmo em ambientes produtivos reais e, portanto, mais relevante do ponto de vista prático para o monitoramento da condição da ferramenta.

Essa representação permite identificar com boa precisão o momento em que a ferramenta atinge seu limite de desgaste, caracterizando o fim da vida útil. Observa-se que o Filtro de Kalman acompanha de forma satisfatória a tendência dos dados experimentais, com maior precisão na região de desgastes mais elevados, justamente os mais críticos para a tomada de decisão sobre a substituição da ferramenta.

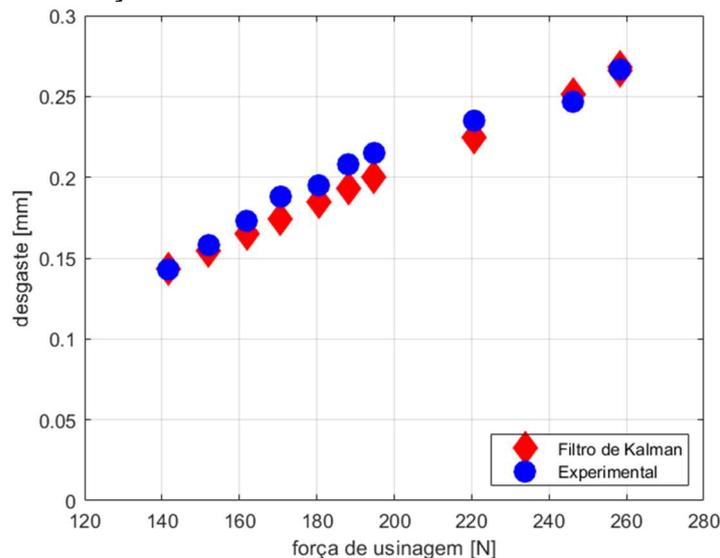


Figura 3 – Resposta do filtro de Kalman em comparação com os dados experimentais.

Conclusões

Este trabalho utilizou um modelo para a previsão de desgaste de ferramentas em processos de torneamento a seco, 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.

XI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA

Itapetininga, 27, 28 e 29 de maio de 2025

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Campus Itapetininga

Referências

ALTINTAS, Y. Manufacturing Automation. Cambridge University Press, 2000.

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*, v. 25, n. 2, p. 331–348, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10910344.2020.1855650>.

SINGH, D.; RAO, P. V. Flank wear prediction of ceramic tools in hard turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 50, p. 479–493, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2550-5>.

WELCH, G. An introduction to the Kalman filter. 1997. Disponível em: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.