



UMA ABORDAGEM PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE INSERTOS EMPREGANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Mateus K. N. Sinzato¹, João Fontes¹ e Armando I. S. Antonialli¹

1 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).
Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP. mateus.keniti@gmail.com

RESUMO

A retificação é um processo abrasivo comumente empregado em operações secundárias por conferir tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, bem como reduzida rugosidade. Além dos aços endurecidos, que frequentemente passam por operações de acabamento com rebolo, outros materiais também são objetos da retificação, como os cermetos: compósitos com partículas cerâmicas e matriz metálica. Conhecidos popularmente como metais duros, esses materiais constituídos majoritariamente de carbeto de tungstênio e cobalto têm larga aplicação como ferramentas para usinagem. Nesse caso, a retificação é um dentre os diferentes processos abrasivos que podem ser aplicados para a preparação das arestas cortantes; mas se verifica uma certa exiguidade de publicações a esse respeito, ainda que em crescente número nos últimos anos. Esta pesquisa pretende utilizar algoritmos de inteligência artificial (IA) como recurso de otimização para a retificação de insertos de metal duro considerando, por exemplo, propriedades do rebolo e parâmetros de usinagem como fatores de influência e características geométricas dos produtos, bem como as componentes da força de retificação, como variáveis de resposta. A partir da revisão bibliográfica, observam-se importantes resultados em IA para processos de retificação. Com base nessa revisão, as principais variáveis a serem implementadas na inteligência artificial foram determinadas. Um modelo preliminar foi elaborado amparado na metodologia de Taguchi com uma matriz ortogonal reduzida; após a análise de variância, será implementado um modelo mais robusto, sempre lançando mão de inteligência artificial via redes neurais.

Palavras-chave: Usinagem. Metal duro. Preparação de aresta.

INTRODUÇÃO

Os processos de retificação devem seguir rígidas tolerâncias de produção, com monitoramento de variáveis de entrada e saída. Com tais variáveis, é possível garantir qualidade, produtividade, segurança e lucratividade. Nesse sentido, pode-se alcançar a completa automatização quando algoritmos de inteligência artificial são empregados para aprender com o processo.^[1]

Ademais, a implementação da Inteligência Artificial (IA) para modelagem e monitoramento requer diversos sensores e variáveis de processo como entrada. A implementação deve ser iniciada com o plano de coleta de dados e os objetivos, com experimentos iniciais do projeto. Após isto, é necessário a escolha dos parâmetros de processo e dos sensores, seguido do processamento destes. Seguindo para as etapas finais, é realizado o esquema algorítmico da IA, associando o processo e os softwares, finalizando com o controle ou não do processo; sendo que a falha retorna a implementação a partir da análise dos parâmetros e sensores utilizados.^[1]

Diversos mecanismos de IA, como Redes Neurais (ou ANN do inglês “Artificial Neural Networks”) e inferência Fuzzy, estão sendo utilizados para a modelagem e monitoramento dos sistemas de usinagem, principalmente no que se refere aos processos abrasivos. [2]

Processos abrasivos, como a retificação, estão em crescente utilização como operações secundárias de manufatura, promovendo elevada qualidade superficial e precisão geométrica, já que possuem maiores repetibilidade e acuracidade. Tais processos conseguem atingir qualidade superficial mais refinada. Além disso, processos abrasivos geram maiores tensões internas e zonas termicamente afetadas. Ademais, cavacos finos são gerados, garantindo que as deformações se concentrem em pequenas regiões determinadas, resultando em maior energia específica para materiais mais resistentes. [1]

No caso da retificação de metal duro, a remoção de material ocorre por meio da interação de pontas de grãos orientados aleatoriamente com o material do inserto. Isto resulta na remoção de uma fração dos carbeto, sendo que o aumento das componentes da força de usinagem faz com que os grãos se atritem, provocando sua regeneração e afiação; de forma que o processo é majoritariamente estável. [3]

Correlacionando as variáveis do processo de retificação de metal duro por meio de inteligência artificial, é possível pré-determinar as respostas em termos de força de usinagem e rugosidade do produto, por exemplo. Alexandre et al. [4] conseguiram prever as condições topográficas de um rebolo em tempo real usando análise de frequência dominante e sistema Fuzzy. Ademais, a determinação de eventos indesejáveis, como a queima, pôde ser determinada pela associação da inteligência ANN baseada nos dados dos sensores de emissão acústica.

Além de ANN, outros algoritmos vêm sendo utilizados para monitorar os processos abrasivos. Dentre os sistemas mais utilizados destacam-se Fuzzy e neuro-Fuzzy, SVM (“Support Vector Machine”), Naive Bayes, DT (“Decision Trees”) e HMM (“Hidden Markov Models”), como apresentado na Figura 1. [1]

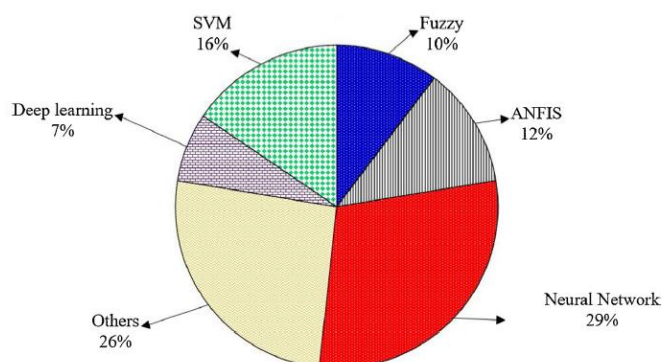


Figura 1: Frequência de utilização de IA para modelagem e monitoramento de processos abrasivos.

Outras técnicas, como Algoritmos Genéricos (“Generic Algorithms” ou GA) e otimização de colônia de formigas (“Ant Colony Optimization” ou ACO) também vêm sendo empregadas. Como pode ser visto na Figura 2, Pandiyan et.al. [1] observou que a imensa maioria dos trabalhos está relacionada, de fato, a processos de retificação que aparecem em número muito maior do que quaisquer outros processos abrasivos.

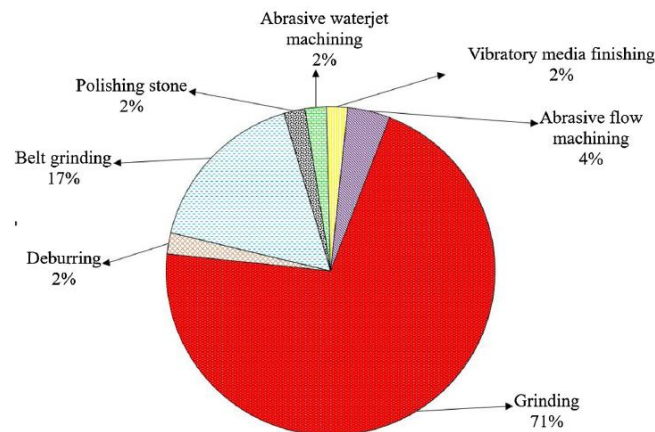


Figura 2: Uso de IA em monitoramento e modelagem de diferentes processos abrasivos na literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3 contém um fluxograma com as principais atividades realizadas durante a pesquisa e os métodos empregados para alcançar os objetivos.



Figura 3: Fluxograma de trabalho.

Destacam-se as seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica: levantamento de arcabouço teórico sobre a retificação de metais duros e algoritmos de otimização baseados em inteligência artificial, por meio do ScienceDirect.
2. Insertos de metal duro HW K10 e retificação: preparação da superfície de folga dos insertos em retificadora CNC Agathon Dom Plus, de quatro eixos, 16 kW de potência e até 3.400 rpm, disponível no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (LPF/DEMec/UFSCar). Uso de rebolo para a retificação de especificação B.K-2A2T350-10-4-27-300-D46-C100, fabricada pela empresa Norton Winter, de formato copo, com diâmetro externo de 350 mm, camada abrasiva de aproximadamente 10 mm de largura e 5 mm de altura, e concentração C100 ($4,4 \text{ kt/cm}^3$) composta por grãos de diamante de tamanho médio de $46 \mu\text{m}$ (D46) e ligante resinoide.
3. Caracterização geométrica: avaliação de parâmetros de rugosidade na superfície retificada, além de aspectos geométricos e integridade superficial por microscópio para análise tridimensional de imagens Alincon InfiniteFocus SL.
4. Metodologia de Taguchi: otimização de parâmetros de usinagem com redução de número de testes necessários em comparação com planejamento fatorial. Abordagem inicial para arranjo ortogonal reduzido para resultados preliminares e, posteriormente, ensaios definitivos em arranjo mais extenso.
5. Otimização com IA: implementação de inteligência artificial com software MatLab.

A etapa de revisão bibliográfica, em fase de conclusão, foi fundamental para garantir o arcabouço teórico tanto sobre a retificação de metais duros quanto sobre algoritmos de

otimização baseados em inteligência artificial. Para tanto, estão sendo empregadas bases de dados como Scopus e ScienceDirect.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho está situado em uma lacuna importante de pesquisa. Realizando a busca na base de dados do ScienceDirect utilizando a string {"tungsten carbide" AND "grinding"} no campo "Title, abstract or author-specified keywords" retornou 135 resultados, sendo 128 artigos de pesquisa. Por sua vez, com a string {"grinding" AND "artificial intelligence"}, 22 resultados, dos quais 18 são artigos de pesquisa. Todavia, com {"tungsten carbide" AND "grinding" AND "artificial intelligence"}, não se obtém qualquer resultado. A Figura 4 apresenta o panorama da evolução de publicações nos últimos quarenta anos, com tendência de crescimento para a string {"tungsten carbide" AND "grinding"} e uma estagnação da string {"grinding" AND "artificial intelligence"}.

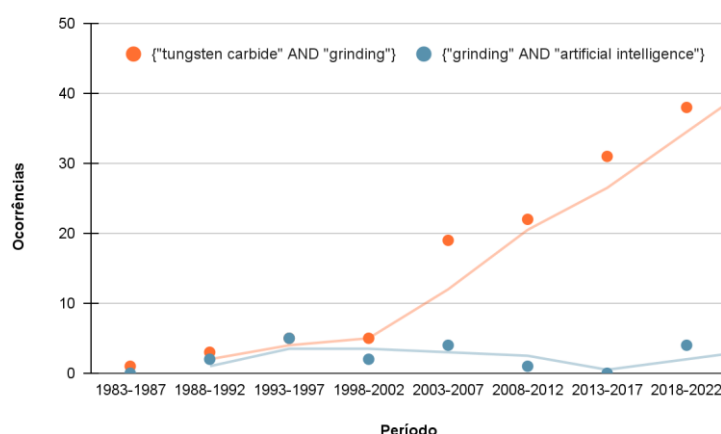


Figura 4: Panorama das publicações relacionadas ao tema de pesquisa.

Por meio de análise de artigos que abordam a questão da retificação e de usinagem de metais duros é possível determinar as principais variáveis, de entrada e de saída, a serem analisadas e aplicadas para a metodologia de Taguchi e no algoritmo de inteligência artificial. Venu Gopal et. al.^[5] utilizou as variáveis de profundidade de usinagem, avanço, tamanho do grão e densidade do grão do abrasivo em Algoritmo Genérico (GA) para otimizar o acabamento superficial em carbetos de silício e, com isto, determinar os parâmetros que afetam na retificação.

Por meio da abordagem estatística de análise de variância (ANOVA), puderam aferir a influência das variáveis sobre o processamento de retificação e determinar um modelo otimizado que oferece uma solução para a redução dos custos de usinagem.

Outros autores indicam que a força e a rugosidade são parâmetros de relevância para o processo de retificação. Segundo Sinha et.al.^[6], o menor coeficiente de fricção é um indicativo da facilidade da retificação, sendo que gera melhores acabamentos superficiais; ademais, observou-se que menores forças de retificação geram menores tensões residuais, incrementando o acabamento superficial.

No entanto, diversos outros fatores podem influenciar no desempenho da retificação. De acordo com Gladkikh et. al.^[7], maiores níveis de avanço aumentam as tensões residuais compressivas enquanto a variação da velocidade de corte não parece promover nenhuma alteração. Além disso, observaram a influência do tamanho e concentração do grão abrasivo na

tensão residual. Ventura et.al.^[8] observaram que grãos abrasivos finos geram menores valores de rugosidade superficial.

Avaliando 30 artigos de relevância para o escopo da pesquisa, encontrados no Science Direct entre os anos de 2001 e 2023 com a string {"grinding" AND "carbide" And"surface integrity"}, pode se observar uma congruência quanto as variáveis analisadas. A Figura 5 apresenta a rugosidade e a força de usinagem como variáveis de saída presentes em grande parte dos artigos.

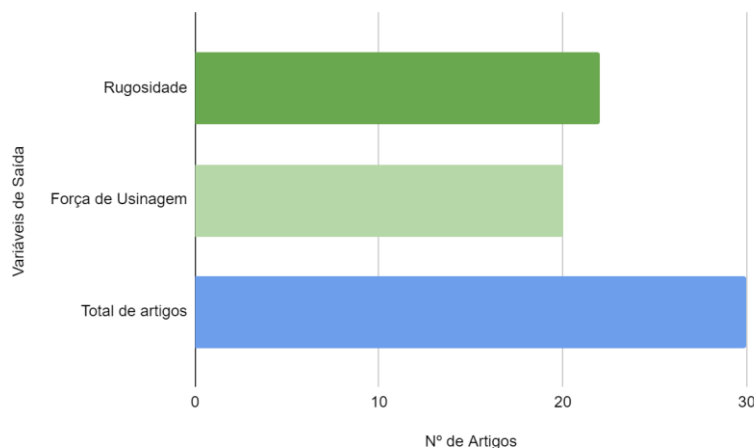


Figura 5: Variáveis de saída de maior relevância bibliográfica.

Dessa forma, inicialmente a pesquisa envolverá o projeto experimental com as variáveis de entrada e saída da retificação dos insertos de metal duro sendo:

- Entrada: Profundidade de usinagem, avanço e tamanho do grão do rebolo
- Saída: Rugosidade e força de usinagem.

Após isso, será feito um trabalho inicial com quantidade reduzida de experimentos, empregando a metodologia de Taguchi e inteligência artificial por meio do MatLab, com a verificação da funcionalidade da otimização do acabamento superficial por meio de testes teóricos com a ferramenta. Com a funcionalidade adequada, pode-se partir para acréscimo de outras variáveis de possível influência, aprimorando o funcionamento da mesma.

CONCLUSÕES

A pesquisa demonstra que a inteligência artificial foi utilizada com sucesso na predição de processos de retificação de outros materiais, o que sinaliza para a possibilidade de aplicação com insertos de metais duros. Por meio da otimização para o acabamento superficial, será possível a determinação dos principais fatores de influência na usinagem e da verificação de interdependência entre as variáveis. Determinando previamente os resultados da engenharia de superfícies dos materiais, obtêm-se previsibilidade sobre o sucesso dos experimentos, com predeterminação de hipóteses e soluções para os problemas estruturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de São Carlos (ProPG/UFSCar) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. PANDIYAN, V.; SHEVCHIK, S.; WASMER, K.; CASTAGNE, S.; TIAHJOWIDODO, T. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review, *Journal of Manufacturing processes*, v. 57, p. 114-135, 2020.
2. ABELLAN-NEBOT, J.V.; SUBIRÓN, F.R. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. *Int J Adv Manuf Technol*, v. 47, 2010.
3. INASAKI, I., TÖNSHOFF, H.K., HOWES, T.D., Abrasive machining in the future, *CIRP Ann*, vol. 42, 1993.
4. ALEXANDRE, F.A, et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model, *Int J Adv Manuf Technol*, v. 96, p. 67–79, 2018.
5. VENU GOPAL, A.; RAO, V.P. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, n. 13, p. 1327-1336, 2003.
6. SINHA, M.K.; SETTI, D.; GHOSH, S.; RAO, P.V. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, p. 124-133, 2016.
7. GLADKIKH, L.I.; SVERDLOVA, B.M.; FUKS, M.Y. Residual stresses in surface layers of carbide tool tips after diamond grinding. *Mater Sci*, n.4, p. 697-702, 1968.
8. VENTURA, C.E.H.; CRUZ, D.C.; SORDI, V.L.; SUYAMA, D.I. Effect of the grinding process on the wear of a cemented tungsten carbide cutting insert during turning, *Procedia CIRP*, vol. 101, p. 174-177, 2021.

AN APPROACH FOR OPTIMIZATION OF THE INSERT GRINDING PROCESS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

ABSTRACT

Grinding is an abrasive process often employed in secondary operations due to the possibility of obtaining narrow dimensional and geometric tolerances, besides low surface roughness. Besides hardened steels, that usually undergo finishing operations with grinding wheels, other materials may also be ground, like cermets: composites with ceramic particles and metallic matrix. Popularly known as hard metals, these materials mainly constituted by tungsten carbides and cobalt have wide application as machining tools. In this case, grinding is one among several abrasive processes that can be applied to the preparation of cutting edges; but it is verified a lack of publications on this purpose, although their increasing number in the last few years. This work intends to apply artificial intelligence (AI) algorithms as an optimization tool for carbide inserts grinding considering, for example, properties of the grinding wheel and machining parameters as input factors and geometric features of the products, as well as components of the grinding force as response outputs. From the literature review, important results are observed on the use of AI for grinding processes. Based on this review, the main variables are determined to be implemented in the artificial intelligence algorithm, which results are developed from a preliminary model using the Taguchi methodology with a small orthogonal array. Afterwards, it is expected to develop the analysis of variance, implementing more complex optimization models.

Keywords: Machining. Carbide. Edge preparation.