



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



EVENTO
ON-LINE

02 a 04
de dezembro 2020

A Metodologia de Superfície de Resposta como ferramenta de modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços: uma revisão.

Rogério Santana Peruchi
Nathan Bezerra de Oliveira
Paulo Rotella Junior
Sandra Naomi Morioka

Departamento de Engenharia de Produção - UFPB
Tarcísio Gonçalves de Brito
Instituto de Engenharias Integradas – UNIFEI

Resumo: Um dos processos de produção mais utilizados na indústria metalúrgica é a fresagem de topo. Essa técnica é utilizada para fabricação de peças automotivas, moldes, e ferramentas em geral. O aço é uma liga metálica composta basicamente por ferro e carbono, e suas propriedades mecânicas combinadas com custos atrativos torna esse material muito utilizado na indústria. A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que permite a modelagem de processos, relacionando as entradas com as saídas. Neste trabalho é apresentada uma revisão da literatura com objetivo de construir um panorama dos trabalhos que realizaram a modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços pela RSM, bem como identificar os principais fatores e respostas utilizadas pelos pesquisadores nos experimentos. Para alcançar esse objetivo, o método de Revisão Sistemática da Literatura foi aplicado. Foi possível identificar que os principais fatores estudados são a taxa de avanço, a profundidade de corte e a velocidade de corte, enquanto as principais respostas são a rugosidade superficial, forças de corte e o desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: Metodologia de Superfície de Resposta, Fresagem de topo, Aço, Modelagem, Otimização.

The Response Surface Methodology as a tool for modeling and optimization of end milling process: a review.

Abstract: One of the most used production processes in the metallurgical industry is end milling. This technique is used to manufacture automotive parts, molds, and work tools. Steel is a metallic alloy basically composed of iron and carbon, and its mechanical properties combined with attractive costs make this material widely used in industry. The Response Surface Methodology (RSM) is a

collection of mathematical and statistical techniques that allows the modeling of processes, relating inputs to outputs. In this work, a review of the literature is presented in order to build an overview of the researches that performed the modeling and optimization of end milling process using RSM, as well as to identify the main factors and responses used by the researchers in the experiments. To achieve this goal, the Systematic Literature Review method was applied. It was possible to identify that the main factors studied are the feed rate, depth of cut and cutting speed, while the main responses are surface roughness, cutting forces and tool wear.

Keywords: Response Surface Methodology, End milling, Steel, Modelling, Optimization.

1. Introdução

A fresagem de topo de peças de aço é um dos processos mais comumente utilizados na indústria de metais (ALAUDDIN *et al.*, 1995; BRITO *et al.*, 2016). Esse processo é um tipo básico e tradicional de usinagem utilizado para remoção de material que permite a fabricação tanto de formas simples quanto complexas. Sua utilização é bastante comum em áreas como a indústria aeroespacial, automotiva, fabricação de moldes, peças de maquinários em geral e muitas outras aplicações (LAZOGLU *et al.*, 2011; LEE e LIN, 2000; ZHANG *et al.*, 2007). A fresagem é um processo mais versátil que as outras formas de usinagem, na qual a ferramenta de corte se movimenta em várias direções para remover material da peça até que seja dado o formato desejado (DE LACALLE *et al.*, 2011).

Van Luttervelt *et al.* (1998) previram que, com o avanço da automação dos processos de produção, seriam necessárias estratégias de monitoramento, previsão e controle de processo cada vez melhores e mais precisas. De fato, nas últimas duas décadas houve uma expansão dos estudos nessa área, e é possível encontrar na literatura diversos estudos que tiveram como objetivo a modelagem e otimização de processos.

Segundo Ma *et al.* (2020), nas pesquisas do campo da mecânica de manufatura, a abordagem experimental é a mais utilizada, pois através de um número limitado de testes consegue modelar a relação entre os fatores de entrada e as respostas, permitindo a previsão de resultados. Uma importante e bastante reconhecida técnica para modelagem de processos é a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), que se baseia na experimentação para criar modelos que relacionam as entradas e respostas de um processo (SANTHAKUMAR e IQBAL, 2019). A RSM se utiliza de arranjos experimentais para criação de modelos preditivos e estatisticamente válidos, produzindo um grande número de informações a partir de uma quantidade relativamente pequena de experimentos (ALAUDDIN *et al.*, 1997; MUKKOTI *et al.*, 2018)

Na literatura, é possível encontrar muitas pesquisas que utilizaram a RSM para modelar o processo de fresamento de topo. Mansour e Abdalla (2002) desenvolveram o modelo matemático para previsão da rugosidade superficial de um tipo de aço (160 BHN), encontrando através da superfície de resposta a combinação ideal de parâmetros para aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade das peças. Kadirgama *et al.* (2008) investigaram o desgaste da ferramenta de corte, desenvolvendo um modelo para prever o momento da troca.

Mukkoti *et al.* (2018) realizaram a modelagem do processo de fresamento para investigar os efeitos do tratamento criogênico da ferramenta de corte nas forças de corte e no consumo de energia. Wojciechowski *et al.* (2017) conduziram uma pesquisa com objetivo de minimizar as forças de corte e aumentar a eficiência do processo, utilizando como um dos parâmetros de entrada a inclinação da peça trabalhada. Gök *et al.* (2017) utilizaram três tipos de revestimento da ferramenta de corte (TiC, TiN e TiAlN) e diferentes

estratégias na escolha do caminho de corte para investigar os efeitos na qualidade da superfície.

Contudo, pesquisadores indicam que os estudos de modelagem e otimização do processo de fresagem de topo ainda são limitados e algumas relações ainda não são claramente compreendidas devido à complexidade do processo, sendo importante conduzir pesquisas para melhorar a eficiência, qualidade e precisão do processo (CHEN et al, 2019; MIA *et al.*, 2017). Da mesma forma, Lobato *et al.* (2014) indicam que, considerando essa complexidade, qualquer tentativa que busque a otimização é válida. Já Kalidass e Palanisamy (2014) sugerem que pesquisas sejam realizadas incluindo mais fatores para analisar suas interações com as respostas.

Dado o contexto apresentado, o objetivo do presente trabalho é contribuir com a literatura fornecendo uma revisão das pesquisas sobre o tema, buscando responder aos seguintes questionamentos: qual o panorama atual dos estudos sobre a modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços? Quais os fatores e respostas que os pesquisadores geralmente selecionam para realização desses estudos?

2. Materiais e métodos

Dada a natureza investigativa necessária para cumprir o objetivo do trabalho, o método de pesquisa escolhido é o de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), já que, segundo Tranfield, Denyer & Smart (2003), este método é o mais adequado para reunir evidências de uma forma transparente, científica e replicável, produzindo resultados robustos e permitindo ao pesquisador um mapeamento do estágio do conhecimento em uma determinada área. Segundo Khan *et al.* (2003), o que diferencia a revisão sistemática das tradicionais é a sua abordagem explícita e metódica, e a sua aplicação pode ser conduzida pela identificação de trabalhos relevantes, resumo, sistematização e interpretação dos resultados.

Os artigos que integram a base de dados da pesquisa foram reunidos através de buscas nas bases Web of Science e Scopus, a exemplo do trabalho de Homrich *et al.* (2018). Essas buscas foram feitas em meados de julho de 2020. A escolha pela utilização das duas bases de dados foi feita para obter uma boa amplitude na busca, pois, segundo Carvalho *et al.* (2013), a Web of Science oferece publicações indexadas em periódicos com alto fator de impacto calculado pelo JCR (Journal Citation Report), enquanto a Scopus, segundo Li *et al.* (2020), é a maior base com literatura revisada por pares.

Para realizar as buscas, várias combinações de termos foram testadas até que fosse obtido o resultado mais coerente possível com o tema de pesquisa. Finalmente, a busca final foi realizada com os termos "end milling", "steel" e "response surface". Além disso, foi aplicado um filtro para recortar apenas artigos e reviews publicados em periódicos, descartando trabalhos de conferência e outros. Em ambas as bases, a busca dos termos foi realizada em títulos, resumos e palavras-chave.

Primeiramente, foi feita a busca na base Web of Science, na qual foram levantados 53 artigos e, na Scopus, foram reunidos mais 57, totalizando 110 publicações. Então, num comparativo entre as duas buscas, foram identificados 39 artigos duplicados, o que reduziu para 71 o número de publicações. Esse conjunto de trabalhos foi denominado de amostra inicial. Então, foi realizado um processo de triagem para retirar da amostra os artigos que não estivessem devidamente alinhados com o escopo da pesquisa. A partir da leitura dos títulos e resumos de cada um dos 71 artigos, foram descartados 23 trabalhos que não atenderam a pelo menos um dos seguintes critérios:

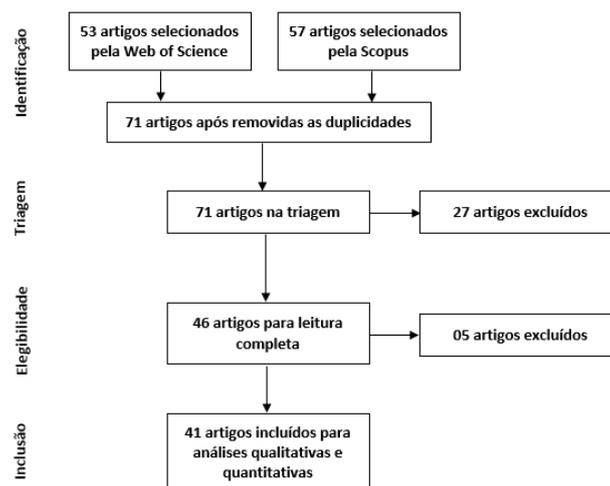
- O material de trabalho deve ser o aço;
- O processo estudado deve ser o de fresagem de topo;
- A modelagem do processo deve ser realizada pela Metodologia de Superfície de Resposta.

Exemplos desses trabalhos retirados da amostra inicial são os de Subramanian, Sakthivel & Sudhakaran (2014), Dikshit, Puri & Maity (2017) e Zeelanbasha, Senthil & Kumar (2018), que usaram como material de trabalho ligas de alumínio, como também o artigo de de Oliveira *et al.* (2019), que investigou o processo de torneamento. Dois artigos foram retirados da amostra porque foram disponibilizados apenas em japonês, e em 6 artigos não foi possível definir claramente se os critérios listados são atendidos ou não, sendo assim mantidos provisoriamente na amostra para a leitura completa. Portanto, chegou-se a um número de 46 artigos após a triagem.

A última fase foi a de refinamento da amostra, na qual foi realizada a leitura completa dos artigos buscando identificar os principais aspectos da pesquisa, com foco na coleta dos parâmetros de entrada e as respostas (ou variáveis de saída) selecionadas pelos pesquisadores. Dos 6 artigos mencionados no parágrafo anterior, 3 foram descartados e 3 foram mantidos na amostra. Além disso, foi identificado que 2 artigos inicialmente selecionados (DHANDAPANI *et al.*, 2015 e LAJIS *et al.*, 2010) não estavam de fato no escopo da pesquisa. Dessa forma, chegou-se ao número de 41 artigos na amostra final.

Todas as etapas desse processo de busca, triagem e refinamento da amostra foi conduzida com base em conceitos adaptados do método PRISMA (*Preffered Report Items for Systematic Reviews and Meta-analyses*). O PRISMA é um checklist composto por 27 itens e um diagrama de fluxo que busca nortear pesquisadores na condução e apresentação de revisões sistemáticas (MOHER *et al.*, 2009). A Figura 1 resume as quatro fases do processo de coleta e refinamento da amostra.

Figura 1 - Fluxograma de seleção, triagem e refinamento de artigos



Fonte 1: Os autores (2020)

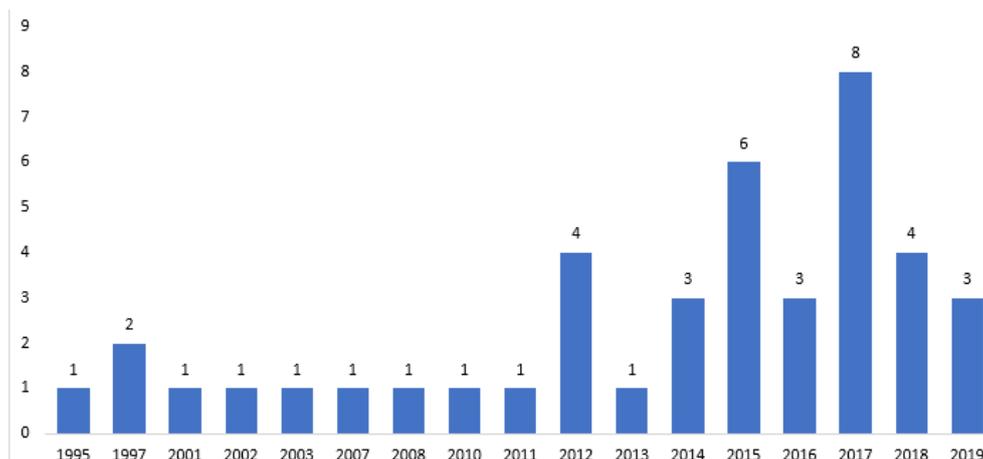
A amostra final será analisada através de abordagens qualitativas e quantitativas. Técnicas de bibliometria serão aplicadas para descrever estatisticamente a amostra quanto à evolução das publicações ao longo dos anos e os principais periódicos da área. Essas estatísticas descritivas serão feitas com apoio do software MS Excel. Em seguida, será apresentada uma análise do conteúdo dos artigos, sumarizando os principais aspectos e materiais utilizados nas pesquisas da área. Por fim e mais importante, serão apresentados os principais fatores e respostas identificados na literatura.

3. Análise de resultados e discussão

3.1 Análise bibliométrica

Um dos objetivos deste trabalho é saber qual o panorama atual dos estudos sobre a modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços? Para obter essa resposta, inicialmente foi realizada uma análise da amostra com base em técnicas bibliométricas. A evolução do número de publicações por ano mostra que, a partir de 2012, houve aumento nas publicações sobre o tema, com destaque para o ano de 2017, no qual foram publicados trabalhos importantes na área, como os artigos de Mia *et al.* (2017) e Wojciechowski *et al.* (2017), conforme Figura 2.

Figura 2 – Evolução das publicações ao longo dos anos



Fonte: Os autores (2020)

Figura 3 - Artigos mais citados

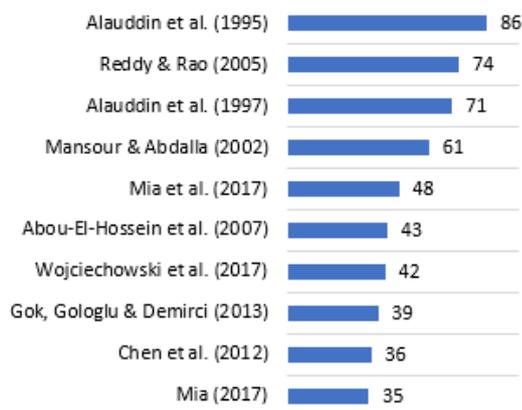
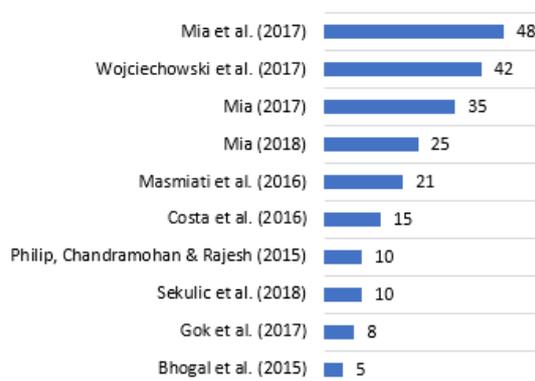


Figura 4 – Artigos mais citados entre os publicados de 2015 a 2019

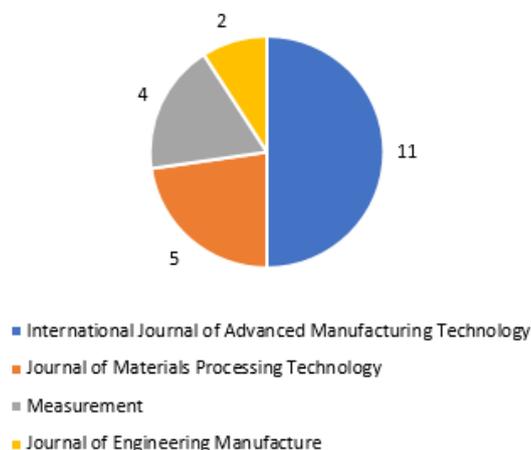


Fonte: Os autores (2020)

O ranking dos dez artigos mais citados considerando toda a amostra final mostra que o trabalho mais citado foi o de Alauddin *et al.* (1995), que desenvolveu um modelo preditivo para a rugosidade superficial do aço 190BHN, conforme observado na Figura 3. Considerando apenas os trabalhos publicados entre 2015 e 2019, o trabalho mais citado é o de Mia *et al.* (2017), que desenvolveu modelos para minimizar as forças de corte e a rugosidade superficial, bem como para identificar a quantidade mínima de lubrificante no

processo de fresagem de topo, conforme Figura 4. A análise desses dois gráficos é importante para identificar as obras mais clássicas sobre o tema, como também os trabalhos que estão em alta no momento. Na Figura 5 estão listados os quatro principais periódicos com mais publicações sobre o tema.

Figura 5 – Principais periódicos



Fonte: Os autores (2020)

3.2 Análise de conteúdo

Conforme discutido anteriormente, o processo de fresagem de topo é amplamente utilizado na indústria para uma grande variedade de aplicações. Cada aplicação necessita de uma ferramenta de corte específica, um material específico e um procedimento que atenda essas necessidades. Os trabalhos que compõem a amostra final também apresentam uma variedade de ferramentas e materiais. Da mesma forma, cada pesquisa utiliza algum tipo de planejamento experimental e algum método de otimização. O objetivo desta seção é investigar como essa variedade está distribuída, ou seja, quais os tipos de materiais trabalhados, as ferramentas, etc.

Existe no mercado diversos tipos de aço, sendo que, nos trabalhos incluídos na amostra, é possível identificar várias composições químicas diferentes. A Tabela 1 mostra os tipos de aço com maior incidência na amostra.

Tabela 1 - Principais tipos de aço

Tipo de aço	Referência
Aços Inoxidáveis (Duplex, 304, 316L, 420)	Kalidass e Ravikumar (2015)
	Philip <i>et al.</i> (2015)
	Kalidass e Palanisamy (2014)
	Alkali <i>et al.</i> (2016)
	Lobato <i>et al.</i> (2014)
Aço endurecido (H13)	Chen <i>et al.</i> (2019)
	Adesta e Riza (2017)
	Gok <i>et al.</i> (2017)
	Chen <i>et al.</i> (2012)
Aço carbono (1045)	Ali <i>et al.</i> (2011)
	Ma <i>et al.</i> (2020)
	Costa <i>et al.</i> (2016)
	Brito <i>et al.</i> (2016)
	Byiringiro <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Os autores (2020)

Quanto aos arranjos experimentais utilizados pelos autores, observa-se que os designs mais comumente utilizados são o Central Composite Design (CCD), Box-Behnken e o de Taguchi, conforme Figura 6. O planejamento da coleta de dados é uma importante etapa desse tipo de pesquisa. Ele define a quantidade de testes a serem realizados, bem como cada arranjo experimental fornece um determinado nível de precisão na modelagem.

Outro aspecto interessante a ser investigado é com relação aos métodos de otimização utilizados nos artigos. Vinte e três deles realizaram algum tipo de otimização do processo, enquanto 18 apenas fizeram a modelagem. Os principais métodos de otimização utilizados são o *Desirability*, *Genetic Algorithm* e *RSM-optimization*, conforme Figura 7.

Figura 1 - Principais arranjos experimentais

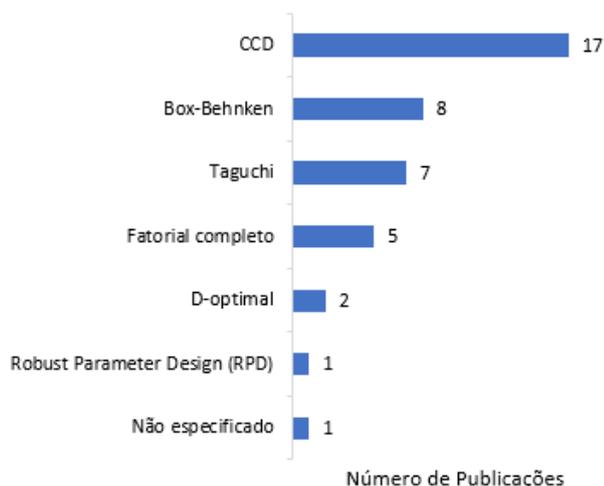
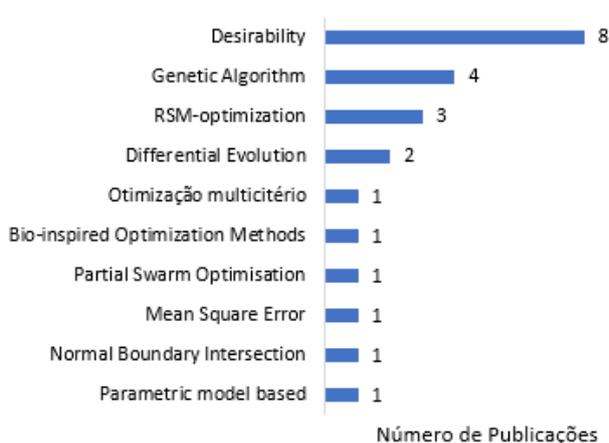


Figura 2 - Principais métodos de otimização



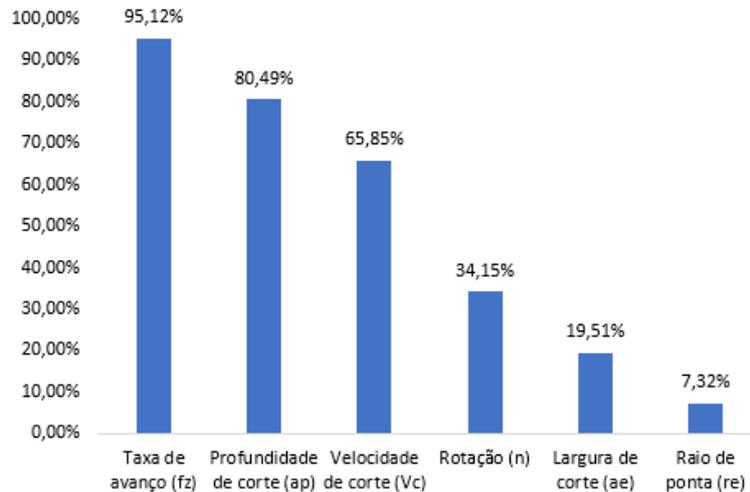
Fonte: Os autores (2020)

3.3 Principais fatores e respostas

Uma série de autores indicam que os fatores (ou parâmetros) que mais influenciam no processo de fresagem de topo são: a velocidade de corte, a taxa de avanço e a profundidade de corte (ABOU-EL-HOSSEIN *et al.*, 2007; MIA, 2017; MUKKOTI, SANKARAI AH e YOHAN, 2018; SANTHAKUMAR e IQBAL, 2019; VIGNESH, IQBAL e TIGERE, 2018). Esse fato é comprovado na amostra de trabalhos do presente estudo, visto que, conforme apresentado na Figura 8, a taxa de avanço foi escolhida como fator de entrada em 95,12% artigos, a profundidade de corte em 80,49% e a velocidade de corte em 65,85%.

Além dos fatores apontados na Figura 8, foram identificados muitos outros que aparecem algumas vezes na amostra. Numa análise mais detalhada, percebe-se que isso se deve a escolha de parâmetros específicos de acordo com o objetivo de cada trabalho. Por exemplo, a pesquisa de Mukkoti *et al.* (2018) buscou analisar o efeito do tratamento criogênico da ferramenta de corte, por isso um dos fatores selecionados foi o tempo de encharcamento da fresa no tratamento criogênico (cryogenic soaking duration). Outro exemplo é o fator de estratégia do caminho da ferramenta (tool path strategy), que foi utilizado nos trabalhos de Adesta e Riza (2017), Gök *et al.* (2017) e Gök, Gologlu e Demirci (2013).

Figura 9 - Principais fatores

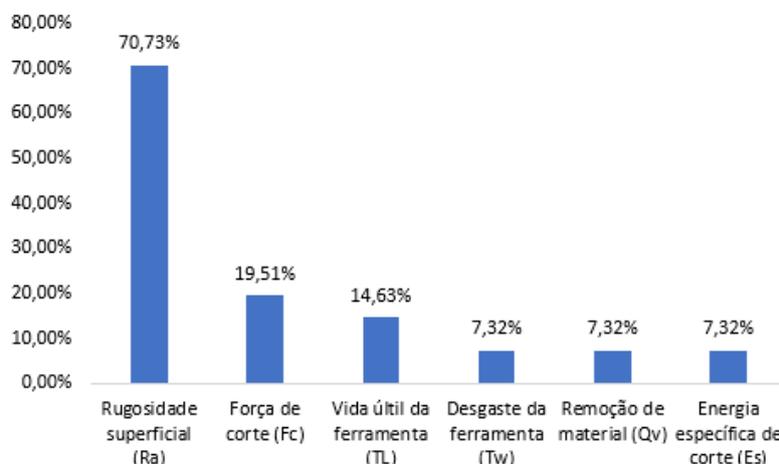


Fonte: Os autores (2020)

Todo produto (seja bem ou serviço) possui características que definem sua qualidade, ou seja, são características fundamentais para determinar se o produto atende ou não as especificações. Essas características podem também ser chamadas de respostas de um processo ou variáveis de saída, e são influenciadas pelos fatores ou variáveis de entrada.

Segundo a literatura, uma das principais resposta de interesse num processo de usinagem de aços é a rugosidade superficial (BHO GAL *et al.*, 2015; HADZLEY *et al.*, 2018; MANSOUR e ABDALLA, 2002; SEKULIC *et al.*, 2018). Essa característica é essencial para avaliar a qualidade da peça e das ferramentas de corte (SANTHAKUMAR e IQBAL, 2019). Na análise da amostra, fica comprovado que a essa característica é a de maior interesse na área, visto que 70,73% das pesquisas utilizaram essa variável, conforme observado na Figura 9.

Figura 9 - Principais respostas



Fonte: Os autores (2020)

Outra característica de bastante interesse nos estudos é a condição da ferramenta de corte, que as vezes é avaliada pela vida útil (medida em minutos) como também pelo desgaste (medido em milímetros). Outras respostas comuns são as forças de corte, a taxa de remoção de material e a energia de corte.

4. Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma revisão da literatura para obter um panorama das pesquisas de modelagem e otimização através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) do processo de fresagem de topo de aços, bem como identificar os principais fatores e respostas que os pesquisadores da área comumente utilizam. Através de uma metodologia sistemática e estruturada, trabalhos foram coletados, organizados e analisados.

Alguns trabalhos mais antigos, como os de Alauddin *et al.* (1995); Mansour e Abdalla (2002) e Reddy e Rao (2005) são referências clássicas e bastante citadas na área. A partir de 2012 houve uma intensificação nas publicações sobre o tema, e alguns trabalhos passaram a ter bastante destaque, como o de Mia (2017, 2018), Mia *et al.* (2017) e Wojciechowski *et al.* (2017). Foram realizadas mais pesquisas utilizando os seguintes tipos de aço: inoxidável, AISI H13 (aço ferramenta) e AISI 1045 (aço carbono).

As variáveis independentes mais escolhidas pelos autores são a taxa de avanço, profundidade de corte e velocidade de corte. Tais parâmetros são reconhecidos como os que mais influenciam nas variáveis dependentes. As principais respostas (variáveis dependentes) são a rugosidade superficial, as forças de corte e o desgaste da ferramenta de corte.

É possível concluir também que a Metodologia de Superfície de Resposta é uma técnica amplamente utilizada e aceita pelos pesquisadores e fornece resultados com boa precisão e economia. O que difere nas pesquisas da amostra é a escolha do arranjo experimental e também do método de otimização utilizado.

É importante ressaltar que a compilação dos resultados alcançados neste trabalho irá contribuir para que pesquisadores tenham uma visão geral acerca do tema de pesquisa, podendo ser um ponto de partida para novas pesquisas, sejam de abordagem teórica ou experimental.

Referências

ABOU-EL-HOSSEIN, K. A.; KADIRGAMA, K.; HAMDI, M.; BENYOUNIS, K. Y. Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 182, n. 1–3, p. 241–247, 2007.

ADESTA, E. Y. T.; RIZA, M. Content Comparative Investigation on Tool Wear During End Milling of AISI H13 Steel with Different Tool Path Strategies. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, v. 6, n. 4, p. 327–333, 2017.

ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M. A.; HASHMI, M. S. J. Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 55, n. 2, p. 123–127, 1995.

ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M. A.; HASHMI, M. S. J. Prediction of tool life in end milling by response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71, n. 3, p. 456–465, 1997.

BHOGAL, S. S.; SINDHU, C.; DHAMI, S. S.; PABLA, B. S. Minimization of Surface Roughness and Tool Vibration in CNC Milling Operation. **Journal of Optimization**, v. 2015, p. 1–13, 2015.

BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; PAULA, T. I.; DALOSTO, D. N.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 5–8, p. 1185–1199, 2016.

CARVALHO, M. M.; FLEURY, A.; LOPES, A. P. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 7, p. 1418–1437, 2013.

CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHANG, W. Optimization analysis considering the cutting effects for high-speed five-axis down milling process by employing ball end mill. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 12, p. 4989–5008, 2019.

OLIVEIRA, L. G.; PAIVA, A. P.; CAMPOS, P. H. S.; PAIVA, E. J.; BALESTRASSI, P. P. Prediction capability of Pareto optimal solutions: A multi-criteria optimization strategy based on model capability ratios. **Precision Engineering**, v. 59, p. 185–210, 2019.

DHANDAPANI, N. V.; THANGARASU, V. S.; SURESHKANNAN, G. Investigation on Effect of Material Hardness in High Speed CNC End Milling Process. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1-6, 2015.

DIKSHIT, M. K.; PURI, A. B.; MAITY, A. Modelling and application of response surface optimization to optimize cutting parameters for minimizing cutting forces and surface roughness in high-speed, ball-end milling of Al2014-T6. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 12, p. 5117–5133, 2017.

GÖK, A.; GÖK, K.; BILGIN, M. B.; ALKAN, M. A. Effects of cutting parameters and tool-path strategies on tool acceleration in ball-end milling. **Materiali in Tehnologije**, v. 51, n. 6, p. 957–965, 2017.

GOK, A.; GOLOGLU, C.; DEMIRCI, H. I. Cutting parameter and tool path style effects on cutting force and tool deflection in machining of convex and concave inclined surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5–8, p. 1063–1078, 2013.

HADZLEY A. B.; AZAHAR W. M.; ANIS A. A.; IZAMSHAH R.; AMRAN M.; KASIM S.; NOORAZIZI, S. Development of surface roughness prediction model using response surface methodology for end milling of HTCS-150. **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 467–476, 2018.

HOMRICH, A. S.; GALVÃO, G.; ABADIA, L. G.; CARVALHO, M. M. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525–543, 2018.

KADIRGAMA, K.; ABOU-EL-HOSSEIN, K. A.; MOHAMMAD, B.; NOOR, M. M.; SAPUAN, S. M. Prediction of tool life by statistic method in end-milling operation. **Scientific Research and Essays**, v. 3, n. 5, p. 180–186, 2008.

KALIDASS, S.; PALANISAMY, P. Experimental Investigation on the Effect of Tool Geometry and Cutting Conditions Using Tool Wear Prediction. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 13, n. 1, p. 41–54, 2014.

KHAN, K. S.; KUNZ, R.; KLEIJNEN, J.; ANTES, Gerd. Five steps to conducting a systematic review. **Journal of The Royal Society of Medicine**, v. 96, p. 3–6, 2003.

LAJIS, M. A.; AMIN, A. K. M. N.; KARIM, A. N. M.; HAFIZ, A. M. K. Preheating in End Milling of AISI D2 Hardened Steel with Coated Carbide Inserts. **Advanced Materials Research**, v. 83–86, p. 56–66, 2010.

LAZOGLU, I.; BOZ, Y.; ERDIM, H. Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 117–120, 2011.

LEE, T. S.; LIN, Y. J. A 3D Predictive Cutting-Force Model for End Milling of Parts Having Sculptured Surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 16, p. 773–783, 2000.

LI, A. Q.; KUMAR, M.; CLAES, B.; FOUND, P. The state-of-the-art of the theory on Product-Service Systems. **International Journal of Production Economics**, v. 222, n. May 2018, 2020.

LOBATO, F. S.; SOUSA, M. N.; SILVA, M. A.; MACHADO, A. R. Multi-objective optimization and bio-inspired methods applied to machinability of stainless steel. **Applied Soft Computing Journal**, v. 22, p. 261–271, 2014.

MA, L.; HOWARD, I.; PANG, M.; WANG, Z.; SU, J. Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove. **Micromachines**, v. 11, p. 494, 2020.

MANSOUR, A.; ABDALLA, H. Surface roughness model for end milling: A semi-free cutting carbon casehardening steel (EN32) in dry condition. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, n. 1–2, p. 183–191, 2002.

MIA, M.; BASHIR, M. A.; KHAN, M. A.; DHAR, N. R. Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40). **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 1–4, p. 675–690, 2017.

MIA, M. Multi-response optimization of end milling parameters under through-tool cryogenic cooling condition. **Measurement**, v. 111, n. April, p. 134–145, 2017.

MIA, M. Mathematical modeling and optimization of MQL assisted end milling characteristics based on RSM and Taguchi method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 121, n. December 2017, p. 249–260, 2018.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, 2009.

MUKKOTI, V. V.; SANKARAIHAH, G.; YOHAN, M. Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide tools on cutting force and power consumption in CNC milling process. **Production and Manufacturing Research**, v. 6, n. 1, p. 149–170, 2018.

- REDDY, N. S. K.; VENKATESWARA RAO, P. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, n. 11–12, p. 1202–1210, 2005.
- SANTHAKUMAR, J.; IQBAL, U. M. Role of trochoidal machining process parameter and chip morphology studies during end milling of AISI D3 steel. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2019.
- SANTHAKUMAR, J.; IQBAL, U. M. Parametric optimization of trochoidal step on surface roughness and dish angle in end milling of AISID3 steel using precise measurements. **Materials**, v. 12, n. 8, 2019.
- SEKULIC, M.; PEJIC, V.; BREZOCNIK, M.; GOSTIMIROVIĆ, M.; HADZISTEVIC, M. Prediction of surface roughness in the ball-end milling process using response surface methodology, genetic algorithms, and grey Wolf optimizer algorithm. **Advances in Production Engineering And Management**, v. 13, n. 1, p. 18–30, 2018.
- SUBRAMANIAN, M.; SAKTHIVEL, M.; SUDHAKARAN, R. Modeling and Analysis of Surface Roughness of AL7075-T6 in End Milling Process Using Response Surface Methodology. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 10, p. 7299–7313, 2014.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.
- VAN LUTTERVELT, C. A.; CHILDS, T. H. C.; JAWAHIR, I. S.; KLOCKE, F.; VENUVINOD, P.K. Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations - Recent Progress in computational mechanics of machining and some difficulties. **Annals of the CIRP**, v. 4, n. 129, 1998.
- VIGNESH, S.; IQBAL, U. M.; TIGERE, G. Optimization of end milling process of Oil Hardened Non-Shrinking Die Steel (OHNS) under different cutting environment using Taguchi and Response surface methodology (RSM) approach. **Advances in Materials and Processing Technologies**, p. 1–17, 2018.
- WOJCIECHOWSKI, S.; MARUDA, R. W.; BARRANS, S.; NIESLONY, P.; KROLCZYK, G. M. Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 111, p. 18–28, 2017.
- ZEELANBASHA, N. BASHA; SENTHIL, V.; KUMAR, B. R. S. An integrated approach of RSM and Moga for the prediction of temperature rise and surface roughness in the end milling of Al 6061-T6. **Transactions of Famena**, v. 42, n. 3, p. 115–128, 2018.
- ZHANG, J. Z.; CHEN, J. C.; KIRBY, E. D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. **Materials Processing Technology**, v. 184, p. 233–239, 2007.