

ESTUDO EMPÍRICO SOBRE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE AÇO DUPLEX: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

EMPIRICAL STUDY ON MODELING AND OPTIMIZATION OF THE DUPLEXSTEEL MILLING PROCESS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Braga, L.F
Oliveira, C.H de
Ribeiro, W.P
Brito, T.G
Nadae, J.de

Resumo: Um dos principais processos produtivos utilizados na indústria metalmeccânica é o fresamento de topo. Essa técnica é utilizada na fabricação de peças automotivas, moldes e ferramentas de trabalho em geral. O aço duplex é uma liga metálica composta basicamente por 20% a 30% de cromo e de 5 a 10% de níquel, com teores muito baixos de carbono (menores de 0,03%) e com adições de nitrogênio, molibdênio, tungstênio e cobre. A Response Surface Methodology (RSM) é uma técnica estatística utilizada para a modelagem e análise de problemas nos quais a variável de resposta é influenciada por vários fatores, cujo objetivo é a otimização dessa resposta. O objetivo é apresentar uma revisão de literatura focada em trabalhos que foram realizados pela modelagem e otimização do processo de fresamento de topo de aço por RSM, buscando identificar a evolução do tema ao longo dos anos e lacunas de melhoria. Para atingir esse objetivo foi aplicada a Revisão Sistemática da Literatura, que é um método transparente, científico e replicável para realizar a revisão da literatura.

Palavras-chave: Otimização; Aço Duplex; RSM; Fresamento.

Abstract: One of the main production processes used in the metalworking industry is end milling. This technique is used in the manufacture of automotive parts, molds and work tools in general. Duplex steel is a metallic alloy basically composed of 20% to 30% chromium and 5 to 10% nickel, with very low carbon content (less than 0.03%) and with additions of nitrogen, molybdenum, tungsten and copper. Response Surface Methodology (RSM) is a statistical technique used for modeling and analyzing problems in which the response variable is influenced by several factors, the objective of which is to optimize this response. The objective is to present a literature review focused on work that was carried out by modeling and optimizing the steel end milling process using RSM, seeking to identify the evolution of the topic over the years and gaps for improvement. To achieve this objective, the Systematic Literature Review was applied, which is a transparent, scientific and replicable method for carrying out the literature review.

Keywords: Optimization; Duplex steel; RSM; Milling.

1 INTRODUÇÃO

O fresamento de topo é um método versátil de usinagem que utiliza uma fresa giratória para remover material em uma trajetória linear ou circular, resultando em superfícies lisas e precisas (SHAW, 2005). Desta forma, tornou-se importante nas indústrias, incluindo a aeroespacial, automotiva e de moldagem por injeção, onde a precisão e o acabamento superficial são cruciais. A capacidade do fresamento de topo de produzir peças com alta precisão e acabamento superficial tornou-o indispensável na produção de componentes mecânicos de alta qualidade (SHAW, 2005).

O monitoramento permite a detecção precoce de variações ou desvios nos processos. Isso é fundamental para identificar problemas rapidamente e tomar medidas corretivas antes que causem defeitos ou falhas.

A abordagem experimental permite identificar e otimizar os fatores que mais afetam a qualidade e o desempenho de produtos e processos. Isso é fundamental para alcançar níveis mais elevados de qualidade e eficiência (MONTGOMERY; 2000). Sendo ainda importante para a economia de recursos, tomada de decisões, inovação e desenvolvimento de produtos, identificação de causas de problemas, controle estatístico de processos, pesquisa e desenvolvimento, redução de riscos e melhoria contínua.

A Response Surface Methodology é uma abordagem estatística que visa otimizar processos e sistemas complexos por meio de experimentos planejados de forma estruturada, Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2016) definem a MSR como "um conjunto de técnicas estatísticas para modelar e analisar respostas complexas e frequentemente não lineares em função de variáveis controláveis".

Considerando o contexto apresentado, esta revisão sistemática da literatura tem como objetivo a identificação de lacunas no conhecimento sobre modelagem e otimização do processo de fresamento no aço duplex, além de avaliar o estado da arte no assunto por meio de um processo replicável e transparente.

Na próxima seção é apresentado o método utilizado na seleção dos trabalhos para a revisão de literatura. Em seguida, as informações coletadas são analisadas e os resultados apresentados e discutidos. Por fim, são apresentadas as conclusões.

2 METODOLOGIA

Dado o caráter investigativo necessário para cumprir o objetivo deste trabalho, o método de pesquisa escolhido foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), uma vez que, segundo Tranfield et al. (2003), este método é o mais adequado para reunir evidências de forma transparente, científica e replicável, produzindo resultados robustos e permitindo ao pesquisador mapear o estágio do conhecimento em uma determinada área. De acordo com Khan et al. (2003), o que diferencia a revisão sistemática das tradicionais é a sua abordagem explícita e

metódica, e sua aplicação pode ser conduzida por meio da identificação de trabalhos relevantes, resumindo, sistematizando e interpretando os resultados.

Para a realização das buscas foram testadas diversas combinações de termos até se obter o resultado mais coerente possível com o tema buscado. Por fim, foi realizada a busca final com os termos *Response surface methodology; Optimization; Steel shaping; End milling; Duplex steel*, foram aplicados filtros para selecionar apenas artigos nas áreas de Engenharias Mecânica, Industrial, Manufatura e Metalurgia, entre os anos de 2013 a 2023, Na base de dados, a busca pelos termos foi realizada em títulos, resumos e palavras-chave conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Filtros básicos e Strings de busca

Palavras-chaves publicações	Critério	n° de
Response surface methodology AND Optimization AND Steel shaping AND End milling AND Duplex steel	Ano 2013 - 2023 Acesso: Livre Áreas: Engenharias Mecânica, Industrial, Metalurgia e Manufatura	161

Primeiramente, foi realizada uma busca na base de dados Web of Science, a qual foi escolhida por unificar e possibilitar a aquisição de trabalhos para análise, na qual foram coletados 161 artigos. Esse conjunto de trabalhos foi denominado amostra inicial. Em seguida, foi realizado um processo de triagem para retirar da amostra artigos que não estivessem devidamente alinhados ao escopo desta pesquisa. Após a leitura dos títulos e resumos de cada um dos 161 artigos, foram descartados 76 trabalhos que não atendiam a pelo menos um dos seguintes critérios: Material de trabalho deve ser Aço Duplex; Processo deve ser fresamento final; Modelagem de processos deverá ser realizada pela Metodologia de Superfície de Resposta.

Alguns artigos foram descartados da amostra inicial por estudarem outros processos, materiais, serem inconclusivos, estarem disponíveis em sua totalidade por acesso gratuito, não terem sido revisados ou estarem incompletos. Devido a estes fatores foram retirados nesta fase 34 artigos, chegando, portanto, em 51 artigos restantes.

A última fase foi o refinamento da amostra, na qual os artigos foram lidos minuciosamente, a fim de identificar os principais aspectos da pesquisa, com foco na

coleta de parâmetros de entrada e respectivos níveis selecionados pelos pesquisadores, bem como na resposta (ou variável de saída), os projetos experimentais e métodos de otimização. Assim, chegou-se ao número de 46 artigos na amostra final conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de exclusão para triagem de publicações

Seleção de artigos	Critérios de exclusão	Nº de artigos excluídos
Fora da área da pesquisa, Triagem: Títulos; resumos, palavras-chave e citações. incompletos	Outros processos; inconclusivos; pagos;	76 34

Todas as etapas desse processo de busca, triagem e refinamento da amostra foram realizadas com base em conceitos adaptados do método PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises). PRISMA é um checklist composto por 27 itens e um fluxograma que busca orientar os 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.

A amostra final será analisada por meio de abordagens qualitativas e quantitativas. Serão aplicadas técnicas bibliográficas para descrever estatisticamente a amostra quanto à evolução das publicações ao longo dos anos e dos principais periódicos da área. Estas estatísticas descritivas serão realizadas com o apoio do software MS Excel. Em seguida, será apresentada uma análise do conteúdo dos artigos, resumindo os principais aspectos e materiais utilizados nesses trabalhos de pesquisa. Por fim, e mais importante, serão apresentados os principais fatores, níveis e respostas identificados na literatura.



Figura 1 - Protocolo de revisão sistemática de literatura adaptado de Moher *et al* (2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise bibliométrica

Para conduzir esta análise, inicialmente foi realizado um estudo da amostra com base em técnicas bibliométricas. A evolução do número de publicações por ano mostra que, a partir de 2016, houve um aumento de publicações sobre o tema, com destaque para o ano de 2020 e 2021, em que foram publicados importantes trabalhos na área, como os artigos de Pimenov (2021) e Glasin (2020), conforme dados apresentados na Figura 2.

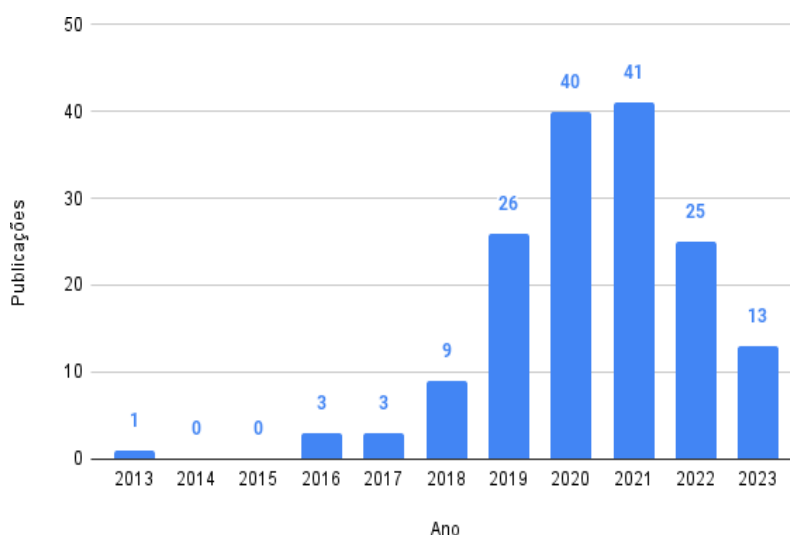


Figura 2 - Evolução das publicações 2013/2023.

Aproximadamente 17% dos artigos publicados da amostra relacionados ao estudo em Modelagem e Otimização de Processo de Fresamento do aço Duplex eram indianos, seguidos de Inglaterra com 17,05%, Rússia com 11,20% e China com 8,03%. O Brasil aparece com três publicações na amostra, o que significa 0,78% das publicações, demonstrando que no Brasil ainda existe uma grande possibilidade do tema ser explorado, conforme descrito na Figura 3.

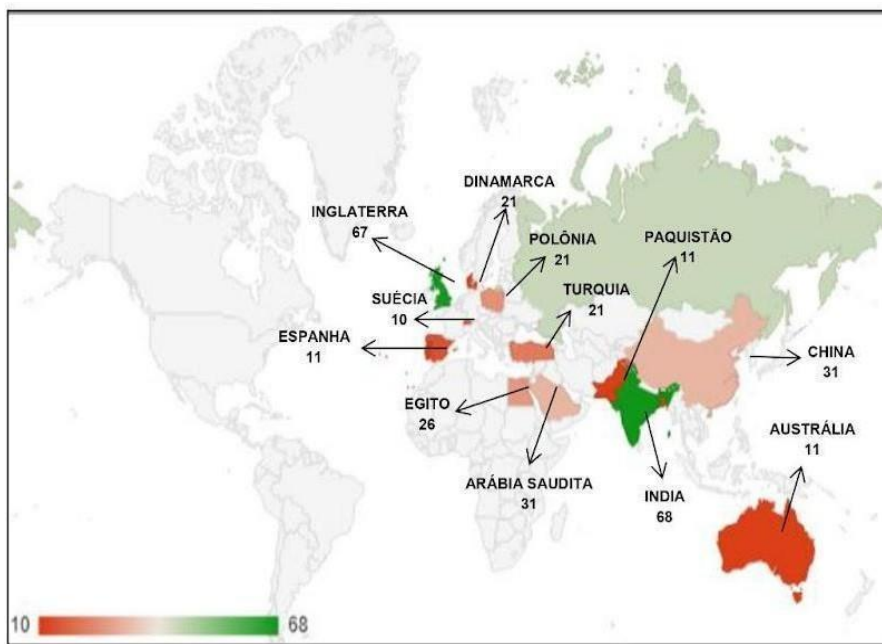


Figura 3 - Distribuição por regiões de publicações.

Além disso, foram encontradas as áreas de engenharia e tecnologia com maior número de publicações, sendo elas: *Materials Science Multidisciplinary*, *Metallurgy Metallurgical Engineering*, *Chemistry Physical*, *Máquinas Physics Applied*, *Physics Condensed Matter*, *Engineering Mechanical*, *Mechanics*, *Engineering Manufacturing*, *Thermodynamics e Engineering Industrial* de acordo com classificação das áreas de publicação da Web of Science, conforme Figura 4.

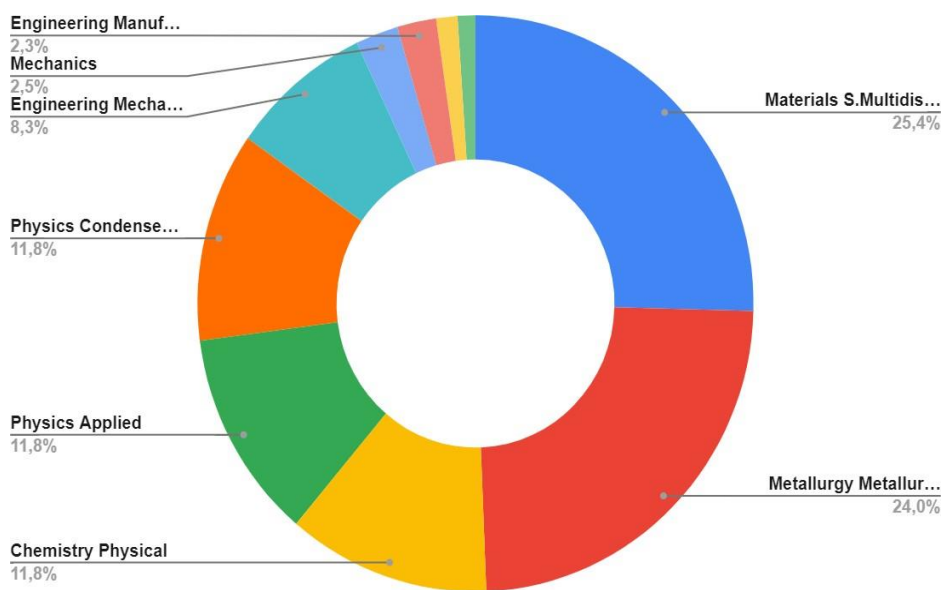


Figura 4- Áreas das publicações de acordo com a Web of Science.

O ranking dos dez artigos mais citados considerando a amostra final, conforme vista na Figura 5, demonstra que o trabalho mais citado foi o de Pimenov (2021), no qual o autor analisou o comportamento das ligas de titânio para os processos de torneamento, fresamento, furação e retificação, e a resposta de como o tipo de resfriamento impacta a integridade da superfície, incluindo a rugosidade superficial, desgastes de ferramenta, vida útil da ferramenta, temperatura, forças de corte, aspectos ambientais, bem como as desvantagens de diversos tipos de resfriamento. A análise desses dois gráficos apresentados é importante para identificar as obras que têm sido mais citadas nos últimos anos.

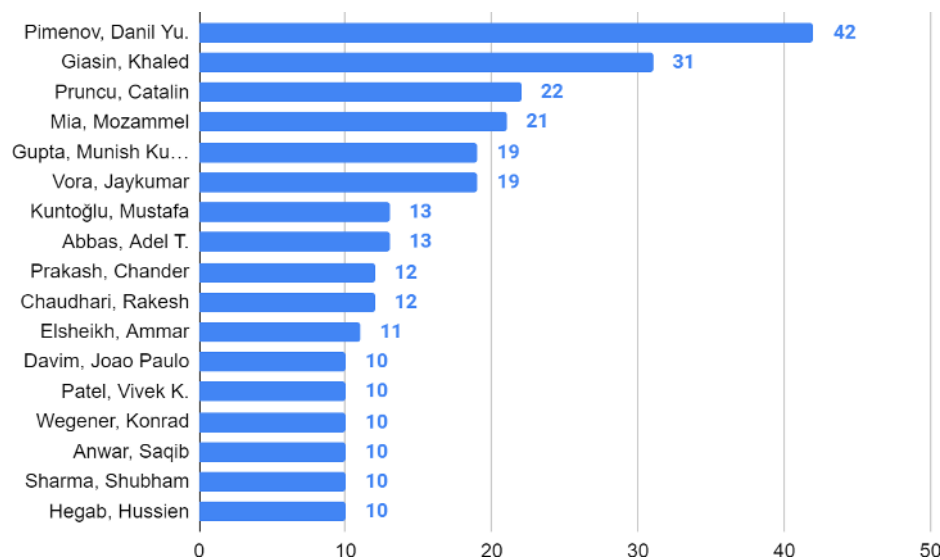


Figura 5 - Autores mais citados na amostra.

Por fim, na última análise, na Figura 6 estão listados os seis principais periódicos com mais publicações sobre o tema.

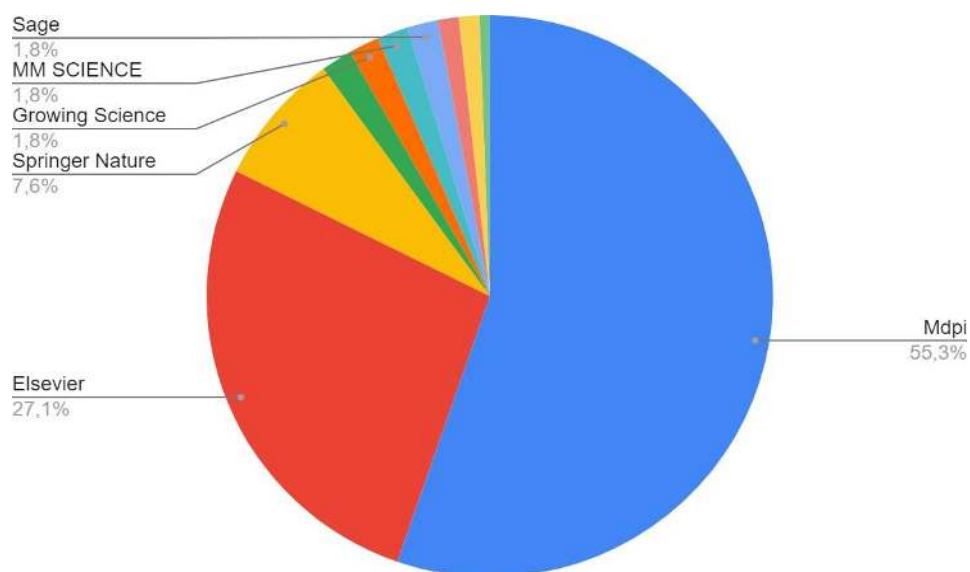


Figura 6 - Bases de dados com maior volume de publicações da amostra.

3.2 Análise de conteúdo

O processo de fresamento de topo é amplamente utilizado na indústria para uma variedade de aplicações. Cada aplicação requer uma ferramenta de corte específica, um material específico e um procedimento que atenda a essas necessidades. As obras que compõem a amostra final também apresentam uma variedade de ferramentas e materiais. Da mesma forma, cada trabalho utiliza algum tipo de projeto experimental e algum método de otimização. O objetivo desta seção é investigar como essa variedade se distribui, ou seja, quais tipos de materiais, ferramentas, etc. Existem vários tipos de aço no mercado e nos trabalhos incluídos na amostra é possível identificar diversas composições químicas diferentes. A Tabela 3 apresenta os diferentes tipos de aço utilizados na amostra.

Tabela 3 – Materiais utilizados nos experimentos

Classificação	Tipo	Referência
Mia; Gupta; Lozano; Carou; Pimenov; Krolczy; ; Dhar; (2016)		
Ligas	Ti-6Al-4V; Nitinol;	Gupta; Sood; Sharma,(2016) Chaudhari; Vora; Prabu;Palani; Patel; Parikh; Lacalle. (2021)

Aços Rápidos	Molibdênio: T11301,11302,11304,11335,11342,11362 Tungstênio: T12015,12001	Kuntoglu; Aslan; Pimenov; Usca; Salur;Gupta; (2020) Mikolajczyk; Giasin; Kaplonek; Sharma. (2021)
Aço Vora ; Pandey; Dodiya, Aço inoxidável	EN 24T SS-309L; SS316L	Mia, M; Dhar, NR (2016) Patel; Khanna; Vaghasia; Chaudhari.(2023)
Mistura Macroscópica	Compósitos de matriz metálicas (MMCs)	Salur, E; Aslan, A; Kuntoglu, M; Gunes, A;Sahin, OS (2020) PHILIP; CHANDRAMOHAN; RAJESH, 2015 OLIVEIRA et al., 2020
<u>Aço Inoxidável</u>	<u>Aço Inoxidável Duplex</u>	

Quanto aos delineamentos experimentais utilizados pelos autores, observa-se que os delineamentos mais utilizados são o Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), conforme Figura 7. O planejamento da coleta de dados é uma etapa importante deste tipo de pesquisa. Define a quantidade de testes a serem realizados, bem como cada desenho experimental proporcionando um certo nível de precisão na modelagem.

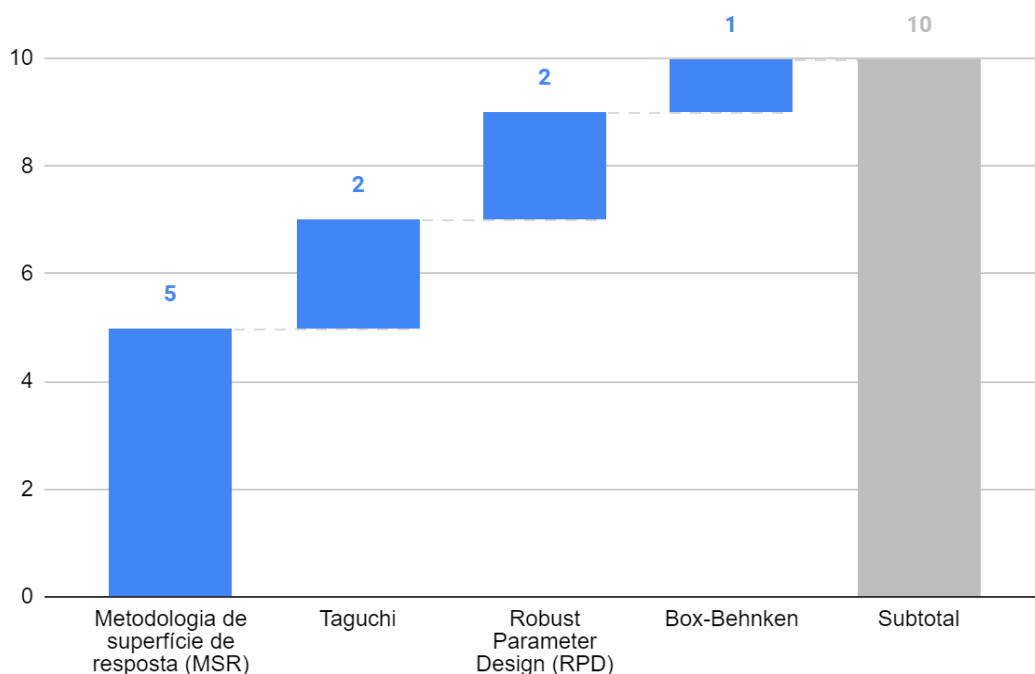


Figura 7 - Desenhos experimentais utilizados nos artigos da amostra.

4 CONCLUSÕES

Esta revisão sistemática da literatura teve como objetivo a identificação de lacunas no conhecimento sobre Modelagem e Otimização do Processo de Fresamento de Aço Duplex e avaliar o estado da arte no assunto através de um processo replicável e transparente.

Objetivou-se avaliar o estado da arte dos Modelagem e Otimização do Processo de Fresamento de Aço Duplex sob as perspectivas descritivas, bibliométricas e de conteúdo. Essas análises foram conduzidas para destacar tendências, métodos, impacto das publicações, acompanhamento de crescimento sobre o tema e os principais autores. Verificou-se, portanto, que os estudos foram aplicados em diversas áreas do conhecimento, porém com a predominância das áreas Industrial, Manufatura e Mecânica.

Pode-se também verificar as possibilidades de avanço no tema no Brasil com seu baixo volume de pesquisas sobre Modelagem e Otimização do Processo de Fresamento de Aço Duplex, bem como a utilização do método em áreas em ascensão como a “Indústria 5.0” que nos últimos anos vem sendo discutida e apontada como uma forma de “retorno ao humano” para os meios de produção.

Esta revisão da literatura possui as seguintes limitações: O título e os resumos obtidos na Triagem 1 foram insuficientes para revelar todas as características de um estudo, o que pode ter influenciado os artigos incluídos. Além disso, os resultados discutidos são generalizados, pois se trata de uma amostra da literatura existente.

Estudos adicionais poderão explorar novos sistemas de produção, como a manufatura aditiva, a manufatura verde e sustentável, a produção mais limpa e as aplicações não manufatureiras, como os sistemas de serviços e de saúde.

Agradecimentos

O autor agradece à FAPEMIG pela bolsa de mestrado concedida para incentivo à pesquisa, bolsa PAPG – Engenharia de produção nº 15514. Todos os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

GUPTA, Munish Kumar; SOOD, P. K.; SHARMA, Vishal S. Machining parameters optimization of titanium alloy using response surface methodology and particle swarm optimization under minimum-quantity lubrication environment. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, n. 13, p. 1671-1682, 2016.

MIA, Mozammel; DHAR, Nikhil Ranjan. Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using Artificial Neural Network. **Measurement**, v.92, p. 464-474, 2016.

VORA, Jay et al. Fabrication of Multi-Walled Structure through Parametric Study of Bead Geometries of GMAW-Based WAAM Process of SS309L. **Materials**, v. 16, n. 14, p. 5147, 2023.

GÜNEŞ, Aydın et al. Optimization study on surface roughness and tribological behavior of recycled cast iron reinforced bronze MMCs produced by hot pressing. **Materials**, v. 14, n. 12, p. 3364, 2021.

Cox, D. R. “Regression Models and Life-Tables.” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 34, no. 2 (1972): 187–220. <http://www.jstor.org/stable/2985181>. Todas as obras

SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. John Wiley & Sons, 2016.

KHAN, Khalid S.; KUNZ, Regina; KLEIJNEN, Jos; ANTES, Gerd. Cinco etapas para conduzir uma revisão sistemática. *Jornal da Royal Society of Medicine*, [S.l.], v. 96, pág. 3–6, 2003. DOI: 10.1177/014107680309600304.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Rumo a uma metodologia para desenvolver conhecimento de gestão baseado em evidências por meio de revisão sistemática. *Jornal Britânico de Gestão*, [S.l.], v. 3, pág. 207–222, 2003. DOI: 10.1111/1467-8551.00375.

PIMENOV, Danil Yu et al. Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. **Journal of materials research and technology**, v. 11, p. 719-753, 2021.

AAMIR, Muhammad et al. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 12484-12500, 2020.

RAJAK, Dipen Kumar et al. Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 6354-6374, 2019.

PIMENOV, Danil Yu et al. Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. **Journal of materials research and technology**, v. 11, p. 719-753, 2021.

ZHANG, Yanbin et al. Nano-enhanced biolubricant in sustainable manufacturing: from processability to mechanisms. **Friction**, v. 10, n. 6, p. 803-841, 2022.

DAS, Subhash; VORA, Jaykumar J.; PATEL, Vivek. Regulated Metal Deposition (RMDTM) technique for welding applications: an advanced gas metal arc welding process. **Advances in welding technologies for process development**, p. 23-32, 2019.

KUNTOĞLU, Mustafa et al. A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: Critical analysis and trends. **Sensors**, v. 21, n. 1, p. 108, 2020.

ABUBAKR, Mohamed et al. Sustainable and smart manufacturing: an integrated approach. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2280, 2020.

SINGH, Sunpreet et al. Current status and future directions of fused filament fabrication. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 55, p. 288-306, 2020.

VORA, Jay et al. Machining parameter optimization and experimental investigations of nano-graphene mixed electrical discharge machining of nitinol shape memory alloy. **journal of materials research and technology**, v. 19, p. 653-668, 2022.

ELSHEIKH, Ammar H. et al. Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. **Solar Energy**, v. 180, p. 622-639, 2019.

GUTIÉRREZ, Juan Carlos Horta et al. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, v. 24, p. 711-719, 2014.

TEJANI, Ghanshyam G.; SAVSANI, Vimal J.; PATEL, Vivek K. Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 3, n. 3, p. 226-249, 2016.

PFEIFFER, Stefan et al. Direct laser additive manufacturing of high performance oxide ceramics: A state-of-the-art review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 41, n. 13, p. 6087-6114, 2021.

MANIMARAN, G. et al. Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication. **Tribology International**, v. 155, p. 106762, 2021.

SHARMA, Shubham et al. Essential oils as additives in active food packaging. **Food Chemistry**, v. 343, p. 128403, 2021.

HEGAB, Hussien et al. Design for sustainable additive manufacturing: A review. **Sustainable Materials and Technologies**, p. e00576, 2023.