

USE OF CRYOGENIC TREATMENT IN TOOL STEEL: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF LITERATURE

USO DE TRATAMENTO CRIOGÊNICO EM AÇOS FERRAMENTA: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA

Camila Coelho Guimarães¹; Vivianne Marques Leite dos Santos²; Bianca de Carvalho Lima³; Eumara Mayra Eugenia Da Silva⁴; Pedro de Aquino Amorim Neto⁵

¹ Colegiado de Engenharia Mecânica- CENMEC - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – Juazeiro/BA – Brasil – camila.guimarães@univasf.edu.br

² Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação – PROFNIT - Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF – Juazeiro/BA – Brasil - vivianni.santos@univasf.edu.br

³ Colegiado de Engenharia Mecânica- CENMEC - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – Juazeiro/BA – Brasil - bianca.lima@discente.univasf.edu.br

⁴ Colegiado de Engenharia Mecânica- CENMEC - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – Juazeiro/BA – Brasil - eumara.mayra@discente.univasf.edu.br

⁵ Colegiado de Engenharia Mecânica- CENMEC - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – Juazeiro/BA – Brasil - pedro.aquino@discente.univasf.edu.br

Resumo

Os avanços tecnológicos têm impulsionado a evolução, a inovação e o desenvolvimento ao longo do último século. Dessa forma, tem-se uma maior exigência por qualidade, quantidade e rapidez, o que na indústria mecânica está, dentre outros fatores, atrelada a melhoria das propriedades físicas e mecânicas das ferramentas, atingidas com diferentes técnicas de tratamento térmico. Com o objetivo de identificar as produções científicas a cerca da utilização de tratamento criogênico em aços ferramenta, para alteração das propriedades mecânicas e consequente aumento da competitividade das indústrias, foi realizada uma investigação concentrada na identificação dos artigos científicos indexados na base de dados Web of Science. O estudo fez um mapeamento das produções científicas para verificar e compreender o contexto das publicações que abordam essa temática. Observou-se que nos últimos dez anos houve um aumento expressivo no interesse pelo assunto, sendo a maioria das publicações provenientes da Índia, seguido pela China. Já os registros Brasileiros se apresentam inexpressivas e foi observado um predomínio da língua inglesa nas publicações científicas. A maior parte dos estudos estão concentrados nas áreas de Ciência dos Materiais Multidisciplinar, Metalurgia – Engenharia Metalúrgica e Engenharia. Os autores "Jurci, P." e "Podornik, B" estão em destaque como os que mais produzem estudos voltados ao tema proposto. Além disso, é possível salientar que, diante dos diferentes fatores que influenciam nos resultados mecânicos dos aços tratados criogenicamente, novos estudos que analisem as técnicas mais eficazes, na garantia das propriedades desses metais, bem como as possibilidades inovativas nesta área são oportunidades para investigações futuras.

Palavras-chave: Tratamento Criogênico; Tratamento Criogênico Profundo; Aço Ferramenta; Estudo Bibliométrico.

Abstract

Technological advances have driven evolution, innovation and development over the last century. In this way, there is a greater demand for quality, quantity and speed, which in the mechanical industry is, among other factors, linked to the improvement of the physical and mechanical properties of the tools, achieved with different heat treatment techniques. With the aim of identifying scientific productions regarding the use of cryogenic treatment in tool steels, to change mechanical properties and consequently increase the competitiveness of industries, a specialized investigation was carried out in the identification of scientific articles indexed in the Web of Science database. The study mapped scientific productions to verify and understand the context of publications that address this topic. It should be noted that in the last ten years there has been a significant increase in interest in the subject, with the majority of publications coming from India, followed by China. Brazilian records are insignificant and there is a predominance of the English language in scientific publications. Most of the studies are concentrated in the areas of Multidisciplinary Materials Science, Metallurgy – Metallurgical Engineering and Engineering. The authors "Jurci, P." and "Podornik, B" are highlighted as those that produce the most studies specific to the proposed topic. Furthermore, it is possible to highlight that, given the different factors that influence the mechanical results of cryogenically treated steels, new studies that analyze the most effective techniques in guaranteeing the properties of these metals, as well as innovative possibilities in this area, are opportunities for future investigations.

Keywords: Cryogenic Treatment; Deep Cryogenic Treatment; Tool Steel, Bibliometric Study.

1. Introdução

O aumento da competitividade das indústrias metalúrgicas está atrelado à elevação de sua produtividade. Esta, por sua vez, depende da durabilidade das ferramentas de corte, bem como da manutenção da qualidade de acabamento dos componentes usinados. Além disso, muitas vezes a velocidade de uso da ferramenta é aumentada para garantir maior produção, o que resulta em maior geração de calor e atrito na interface peça-ferramenta e consequente diminuição da dureza e aumento do desgaste (CASTILHO, 2019).

Ferramentas como brocas e fresas helicoidais, por exemplo, submetidas a trabalhos em velocidades elevadas e altas temperaturas, necessitam de alta dureza e resistência, sem alteração de suas condições em circunstâncias extremas de operação. Para isso, o uso do tratamento térmico criogênico vem sendo apresentado como uma técnica capaz de melhorar as propriedades desses aços (CASTILHO, 2019), resultantes de mudanças microestruturais.

Segundo Moreira et al. (2009), o tratamento criogênico recebeu atenção especial nas últimas décadas, como uma técnica, indicada por alguns autores, capaz de aumentar significativamente a vida útil das ferramentas de corte. No entanto os resultados apresentados na literatura não são um consenso quanto as mudanças microestruturais e as propriedades modificadas pelo resfriamento a temperaturas negativas. O fato é que na literatura variadas técnicas de tratamento criogênico são relatadas e o

detalhamento dos parâmetros de aplicação, por vezes suprimidos, influenciam nos efeitos do tratamento. Os procedimentos utilizados podem variar em termos de temperatura, tempo de tratamento e forma de resfriamento.

De acordo com Podgornik et al. (2016), o tratamento criogênico profundo tem recebido cada vez mais atenção em muitas aplicações de ferramentas. É definido como um processo complementar ao tratamento térmico convencional se adicionado após o processo convencional de têmpera e revenido ou como processo suplementar entre têmpera e revenido, e envolve o resfriamento do material a cerca de -196°C por até 40 horas. Mas o efeito do tratamento depende do tipo e da composição química do aço, o que influencia consideravelmente a maneira como é alterada a capacidade mecânica, tribológica e de suporte de carga do aço para ferramentas.

O conhecimento do acervo científico sobre a utilização de tratamento criogênico em aços ferramenta, como forma de melhorar suas propriedades mecânicas e consequente produtividade da indústria, é muito importante para evolução industrial e para o desenvolvimento tecnológico. Sendo assim, o presente trabalho consiste na realização de um mapeamento das produções científicas para identificar e compreender a utilização dessa técnica nesses metais, através de uma pesquisa bibliométrica, utilizando a *Web of Science* como base de dados.

2. Metodologia

Esta pesquisa bibliométrica utilizou como referência a metodologia adotada por Santos et al. (2024) em seus estudos, bem como a sequência de apresentação dos resultados, sendo que, neste caso, o tema investigado foi sobre o tratamento criogênico dos aços ferramenta. Já a base de dados escolhida foi equivalente à utilizada pelos autores, a *Web of Science*, bem como a definição da regra de busca, sendo os termos pesquisados em “topic”, referindo-se a busca no Título, Resumo e Palavras-chave.

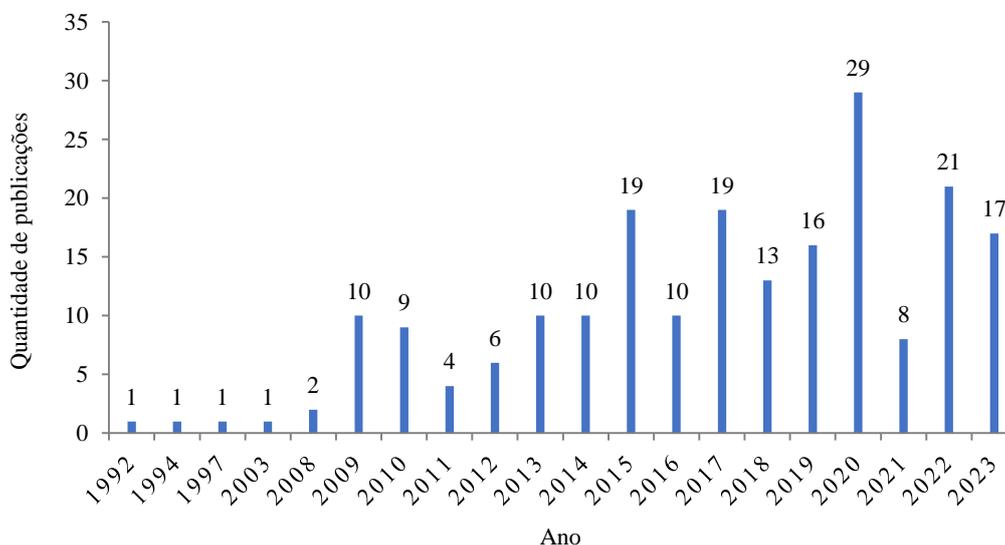
O intervalo temporal do estudo compreende os anos de 1990 a 2023, sendo a pesquisa limitada a artigos e artigos de revisão. A combinação de termos e booleanos empregados foram: “*Cryogenic Treatment*” (Topic) AND “*Tool Steel*” (Topic), optando-se pelos termos no idioma inglês, tendo em vista o aumento da quantidade de resultados, e o uso de aspas, para garantir a seleção de artigos relacionados ao tema de interesse. Após a pesquisa na base de dados, seguiu-se para a etapa de análise dos resultados da pesquisa, leitura dos resumos dos trabalhos e do texto completo de alguns artigos. A ferramenta de análise de resultados do *Web of Science* foi empregada para o tratamento dos dados, por permitir agrupar e classificar em diferentes campos.

No que diz respeito as métricas analisadas, averigou-se a quantidade de publicações por: países, idiomas, áreas de concentração, autores e, por fim, em relação ao ano. Os resultados foram plotados em forma de gráficos através do *software* Excel.

3. Resultados e Discussão

Por meio das pesquisas na bases de dados, encontrou-se 207 publicações no intervalo temporal compreendido entre 1990 e 2023 (Figura 1), ressaltando-se que o primeiro registro se deu em 1992. O ano com maior quantidade de publicações foi 2020, apresentando 29 registros. De toda a publicação registrada, 43,96% está relacionado aos últimos cinco anos (2023, 2022, 2021, 2020 e 2019). Já no que concerne os dez últimos anos (2023, 2022, 2021, 2020, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015 e 2014), tem-se 78,26% do total de registros. Analisando-se os primeiros dez anos em que foram realizadas publicações, compreendido no período de 1992 a 2001, observa-se poucos estudos sobre tratamento criogênico de aços ferramenta, com um total de 1,45% dos registros. Isto evidencia que nos últimos anos a comunidade acadêmica tem dispendido um maior interesse em relação a essa temática.

Figura 1- Quantidade de Publicações por Ano



Fonte: Autoria própria a partir de dados da *Web of Science*

O primeiro artigo sobre o tema, datado de 1992, tem como título: "*Does Liquid-Nitrogen Immersion Improve Wear-Resistance of Steel and Cast-Iron*". Neste artigo é feita uma investigação pelo Instituto de Pesquisa de Celulose e Papel do Canadá sobre o efeito do tratamento criogênico profundo em ligas de aço e ferro fundido normalmente encontrados em fábricas de celulose e papel,

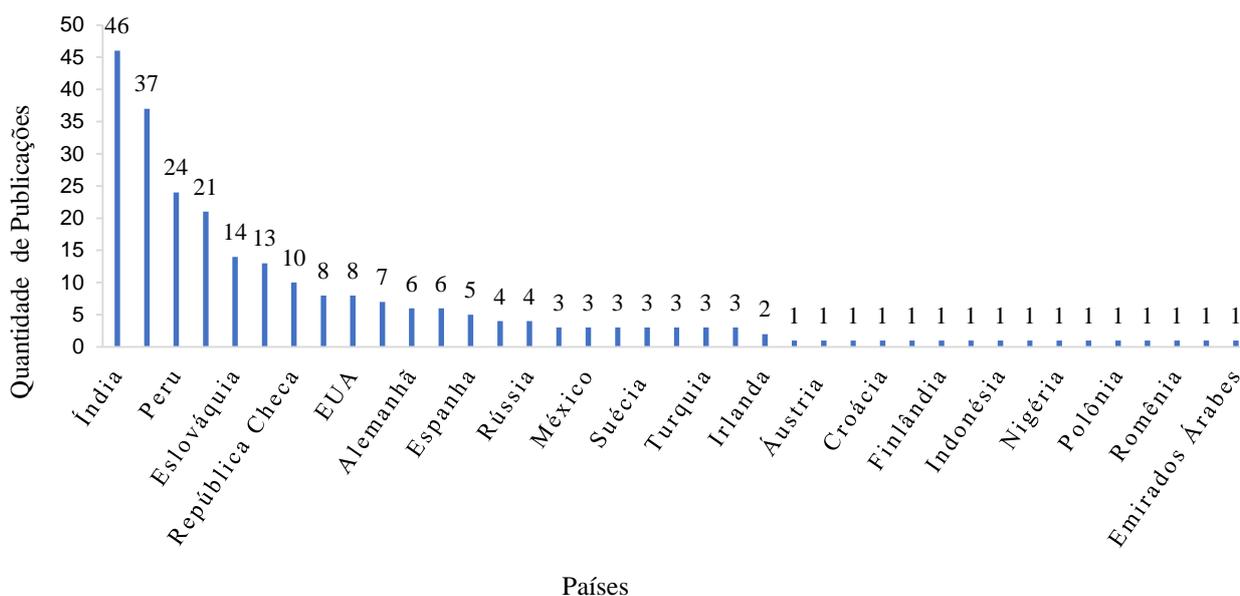
em itens como placas de refinador, cortadores e rolos de calandra. O resultado mostrou que o tratamento teve pouco efeito na melhoria da resistência ao desgaste desses metais. A dureza das ligas após o tratamento com nitrogênio líquido não foi um indicador do desempenho subsequente ao desgaste. Sobre este parâmetro, o melhor resultado foi obtido por uma liga de aço ferramenta, mas foi inferior a 10% e, em alguns materiais testados, a imersão reduziu a resistência à abrasão da liga (THOMPSON; BROWN, 1992).

O último artigo publicado, intitulado “ *Wear characteristics, reduction techniques and its application in automotive parts - A review*”, aborda uma revisão do estado da arte sobre características de desgaste, testes, técnicas de redução e aplicação em peças automotivas. Sendo que, no que tange o interesse dessa pesquisa, o documento destaca o tratamento térmico criogênico (especialmente o tratamento térmico criogênico profundo) como um meio de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, devido à redução da tensão residual e do coeficiente de atrito, melhora do antidesgaste, dureza, tenacidade e resistência à fadiga em peças automotivas (AJUKA et al., 2023).

Na Figura 2, tem-se a quantidade de registros por país. Observa-se que a Índia e a China foram os países que mais registraram trabalhos sobre a temática deste estudo (46 e 37, respectivamente), representando, nessa ordem, 22,22 e 17,87% do total. Esses países se destacam na produção mundial de aço, como maiores produtores, e na metalurgia. Em terceiro lugar está o Peru com 24 registros, o que corresponde a 11,59%. Na quarta posição está o Irã, com 21 registros, e a quinta posição é ocupada pela Eslováquia, com 14 registros. Em relação aos registros feitos pelo Brasil, observa-se que, juntamente com os Estados Unidos da América, cada um publicou 8 artigos, ocupando, desse modo, a oitava posição.

O primeiro artigo publicado pelo Brasil, “*Ultra-low-temperature process effects on microscale abrasion of tool steel AISI D2*”, data de 2019 e é de autoria de Gobbi, S. J. Gobbi, V. J., Reinke, G., Muterlle, P. V. e Rosa, D. M, apresentando 14 citações. Os autores avaliaram a resistência ao desgaste de amostras de aço ferramenta AISI D2 submetidas a diferentes ciclos de tratamento térmico, com e sem tratamento criogênico profundo (-196°C), e observaram uma redução do coeficiente de desgaste e melhoria da microdureza para as amostras resfriadas em nitrogênio líquido, em comparação com aquelas que não passaram por esse tratamento. Segundo os autores, o aumento de resistência ao desgaste está relacionado à transformação da austenita retida em martensita e ao aumento da quantidade de carbonetos precipitados com o tratamento criogênico profundo (GOBBI et. al, 2019).

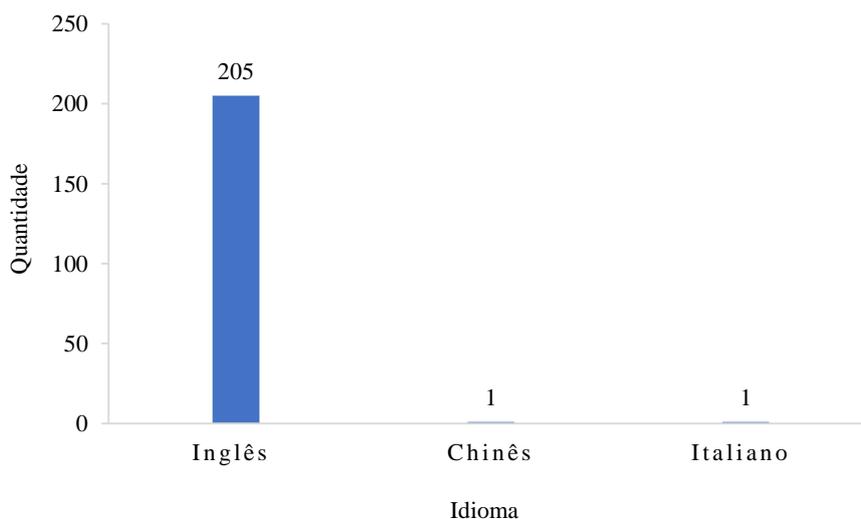
Figura 2 - Quantidade de Publicações por Países



Fonte: Autoria própria a partir de dados da *Web of Science*

Em relação ao idioma das publicações, nota-se na Figura 3 que a língua inglesa é a mais utilizada e está presente em 205 publicações, representando 99,03% do total. Ademais, outros dois idiomas aparecem nos registros, porém a quantidade de publicações nestes idiomas é insignificante, sendo 1 artigo em chinês e 1 artigo em italiano.

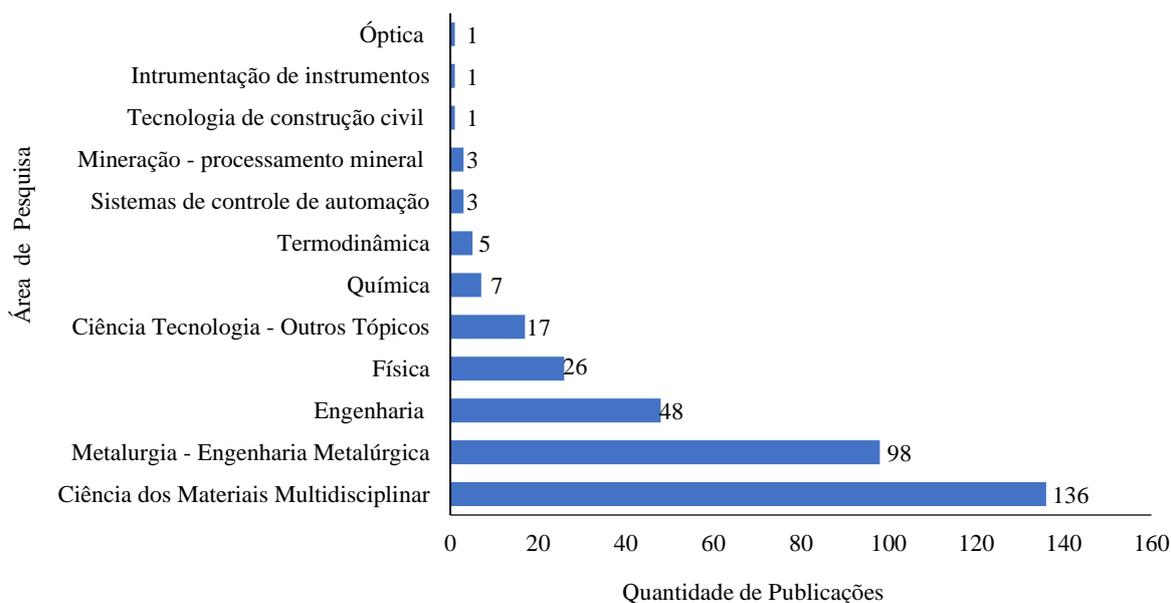
Figura 3 - Quantidade de Publicações por Idioma



Fonte: Autoria própria a partir de dados da *Web of Science*

Em referência à área de pesquisa, o maior destaque se dá para Ciência dos Materiais Multidisciplinar, com 136 registros, representando 65,70%, conforme pode ser visto na Figura 4. Na segunda posição está a área de Metalurgia – Engenharia Metalúrgica, com 98 registros, representando 47,34%. A terceira posição é da área de Engenharia, com 48 registros, representando 23,19%. Ressalta-se que as publicações podem estar enquadradas em mais de uma área de pesquisa.

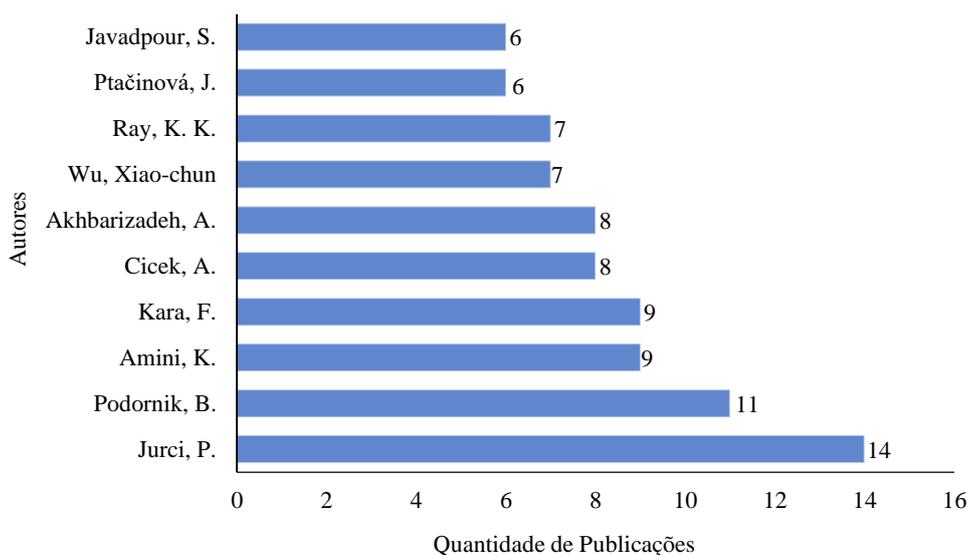
Figura 4 - Quantidade de Publicações por Área de Pesquisa



Fonte: Autoria própria a partir de dados da *Web of Science*

Os 10 principais autores que mais publicaram sobre a temática deste estudo estão especificados na Figura 5, bem como a quantidade de publicações de cada um. O autor que mais tem registros em seu nome, ocupando o primeiro lugar, é “Jurci, P.”, com 14 publicações. Com 11 publicações está o segundo autor que mais publicou sobre tratamento criogênico em aços ferramentas, o “Podornik, B.”. Já na terceira posição estão os autores "Amini, K." e “Kara, F.”, com 9 registros cada um. O percentual total de registros dos 10 principais autores compreende 37,68%. Isto indica que a temática é de interesse de diferentes autores e que os estudos não estão sendo realizados de forma concentrada por um determinado autor/grupo de pesquisa.

Figura 5 - Quantidade de Publicações por Autores



Fonte: Autoria própria a partir de dados da *Web of Science*

Os dois autores com maior número de publicações são coautores do artigo “*Sliding wear behaviour of conventional and cryotreated PM Cr-V (Vanadis 6) ledeburitic tool steel*”, publicado em novembro de 2023. Os autores analisaram o efeito do tratamento criogênico, a -85°C , -140°C e -196°C , seguido de revenido duplo a 170°C ou 530°C por 2 h, nas propriedades mecânicas de amostras de aço ferramenta ledeburíticos Cr-V, e observaram um aumento de 10% na dureza, para as amostras criotratadas, em comparação com as tratadas convencionalmente após revenido a 170°C . Enquanto que aquelas que foram revenidas a 530°C apresentaram uma queda de 7% na dureza e não apresentaram melhoria do desgaste (YARASU et al., 2023).

Os autores ainda observaram que o tratamento criogênico a -140°C , combinado com revenimento a 170°C , produziu a condição de processo ideal para melhorar o desempenho de desgaste, resultando em uma melhoria significativa de 24% no desempenho do desgaste abrasivo em comparação com as amostras tratadas convencionalmente.

4. Conclusão

Foram encontrados 207 artigos científicos indexados na base de dados *Web of Science* a respeito de tratamentos criogênico em aços ferramenta, predominantemente publicados na língua inglesa. Um maior interesse sobre a temática foi observada nos últimos 10 anos. A Índia se destaca em quantidade de publicações por país, com 46 registros, seguido da China, com 37 publicações. Já o Brasil não apresentou número expressivo de registros.

A área de pesquisa que mais se destaca é Ciência dos Materiais Multidisciplinar, com 65,70% do total de registros, seguida por Metalurgia – Engenharia Metalúrgica, com 47,34%. Em terceiro lugar está a área de Engenharia, com 23,19%.

O autor que possuem mais publicação é “Jurci, P.”, com 14 registros, representando 6,76%, o que evidencia ser uma área de interesse de vários autores e que as publicações não são de autoria concentradas em um cientista.

Os resultados contribuem para nortear o desenvolvimento de pesquisas e inovação na área, uma vez que contém informações sobre possíveis parceiros/pesquisadores com *know how* nessa temática e também em quais países as tecnologias geradas podem ser atrativas, como a Índia e a China.

O tema ainda apresenta possibilidade de exploração, tendo em vista os diferentes fatores que influenciam no resultado, bem como as diferentes técnicas de tratamentos criogênicos que podem ser adotados, sendo assim, é uma perspectiva para trabalhos futuros a investigação detalhada das técnicas mais abordadas e mais eficazes trazidas pela literatura, tal qual as possibilidades de inovação dos aços ferramenta.

Referências

- AJUKA, L. O.; OGEDENGBE, T. S., ADEYI, T., IKUMAPAYI, O. M.; AKINLABI, E. T. Wear characteristics, reduction techniques and its application in automotive parts – A review. *Cogent Engineering*, v. 10 (1), p. 1-33, 2023.
- CASTILHO, W. S. Tratamentos criogênicos nos metais. *Revista Sítio Novo*. v. 3, n. 2, p. 115-126, 2019.
- DOS SANTOS, R. S. ; FABRIS, J. P. 2 ; DE SANTANA, J. R.; RUSSO, S. L. The impact of technologies on crime prevention in urban environments, a bibliometric analysis of literature. *Revista INGI –Indicação Geográfica e Inovação*. v.8, n.1, p.2447-2455, 2024.
- GOBBI, S. J.; GOBBI, V. J.; REINKE, G.; MUTERLLE, P. V.; ROSA, D. M. Ultra-low-temperature process effects on microscale abrasion of tool steel AISI D2. *Materials Science and Technology*. v. 35 (11), p. 1355-1364, 2019.
- MOREIRA, J.C.; ÁVILA, R.F.; GODOY, G.C.D.; ABRÃO, A.M. Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, p. 932 - 946, 2009.
- PODGORNIKA, B.; PAULINA, I.; ZAJEC, B.; JACOBSONC, S.; LESKOVSEK, V. Deep cryogenic treatment of tool steels. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 229, p. 398-406, 2016.
- THOMPSON, C. B.; BROWN, K. A. Does liquid-nitrogen immersion improve wear-resistance of steel and cast-iron. *Tappi Journal*. v. 75, p. 173-179, 1992.
- YARASU, V., JURCI, P., GOGOLA, P., PODGORNIK, B., SEDLAČEK, M. Sliding wear behaviour of conventional and cryotreated PM Cr-V (Vanadis 6) ledeburitic tool steel. *Wear*. v. 532–533, 2023.