

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DA ELETROEROSÃO EM UMA EMPRESA
FABRICANTE DE CAIXAS DE ENGRENAMENTO**

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING
IN A GEARBOX MANUFACTURING COMPANY**

André Luiz Bianchi – andre.bianchi@fatec.sp.gov.br
Fatec – Taquaritinga – SP – Brasil

Ramílio Ramalho Reis Filho – ramilio.ramalho@hotmail.com
Fatec – Taquaritinga – SP – Brasil

DOI: 10.31510/infa.v22i1.2200
Data de submissão: 05/04/2025
Data do aceite: 26/06/2025
Data da publicação: 30/06/2025

RESUMO

A usinagem por eletroerosão é um processo amplamente utilizado na indústria para fabricar peças de alta precisão e complexidade geométrica. Este artigo aborda a aplicação desse processo na usinagem de rasgos de chaveta, um componente essencial para transmissão de torque entre eixos e acoplamentos mecânicos. A metodologia empregada inclui revisão bibliográfica, análise de parâmetros do processo e estudo experimental em diferentes condições operacionais. Os resultados demonstram que a eletroerosão permite a fabricação de rasgos de chaveta com elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial, reduzindo a necessidade de processos de acabamento subsequentes. A discussão compara a eficiência da eletroerosão com métodos convencionais, destacando suas vantagens e limitações. Conclui-se que a eletroerosão é uma alternativa viável para usinagem de rasgos de chaveta em materiais de elevada dureza, proporcionando alta qualidade e repetibilidade do processo.

Palavras-chave: Eletroerosão, Rasgo de Chaveta, Usinagem de Precisão, Fabricação Mecânica, Acabamento Superficial.

ABSTRACT

Electrical discharge machining (EDM) is a widely used process in the industry for manufacturing high-precision parts with complex geometries. This article discusses the application of this process in the machining of keyway slots, a crucial component for torque transmission between shafts and mechanical couplings. The methodology employed includes a literature review, process parameter analysis, and an experimental study under different operating conditions. The results demonstrate that EDM enables the fabrication of keyway slots

with high dimensional accuracy and excellent surface finish, reducing the need for subsequent finishing processes. The discussion compares the efficiency of EDM with conventional machining methods, highlighting its advantages and limitations. It is concluded that EDM is a viable alternative for machining keyway slots in high-hardness materials, ensuring high-quality and process repeatability.

Keywords: Electrical Discharge Machining, Keyway Slot, Precision Machining, Mechanical Manufacturing, Surface Finish.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Dio (2018), os processos de usinagem tiveram origem em técnicas artesanais, mas ao longo do tempo passaram a adotar tecnologias avançadas, resultando em maior qualidade nos produtos, melhor desempenho das máquinas, maior flexibilidade dos equipamentos e ferramentas, além de uma relação mais favorável de custo-benefício. Isso também trouxe benefícios como a redução da intervenção humana durante a operação das máquinas (aumentando a segurança dos trabalhadores) e diminuindo o impacto ambiental.

Tradicionalmente, essas operações eram executadas por especialistas, conhecidos como metalúrgicos ou torneiros mecânicos, que ainda desempenham um papel, mas, atualmente, a automação reduziu a necessidade de intervenção humana direta. Uma distinção importante entre máquinas CN e CNC é que as CN não possuem memória, apenas seguem as instruções sem a possibilidade de mudanças em tempo real. Por outro lado, as máquinas CNC têm a capacidade de armazenar informações e permitem alterações nos processos de fabricação, o que amplia suas funcionalidades (SOUZA, 2018). A integração de computadores às máquinas-ferramenta, por meio de programas específicos, tornou possível controlar praticamente todas as fases do processo de usinagem, incluindo o posicionamento da ferramenta, a seleção de rotações e velocidades, a troca de ferramentas, o fluxo de fluido de corte e as etapas de desbaste e acabamento.

O CNC transmite eletronicamente as instruções para o equipamento de produção, controlando suas funções e operações. Sua capacidade de alterar programas torna essa tecnologia altamente flexível, especialmente adequada para a produção em pequenos e médios lotes, sendo mais fácil desenvolver novos programas do que ajustar os equipamentos de produção (REBEYKA, 2008).

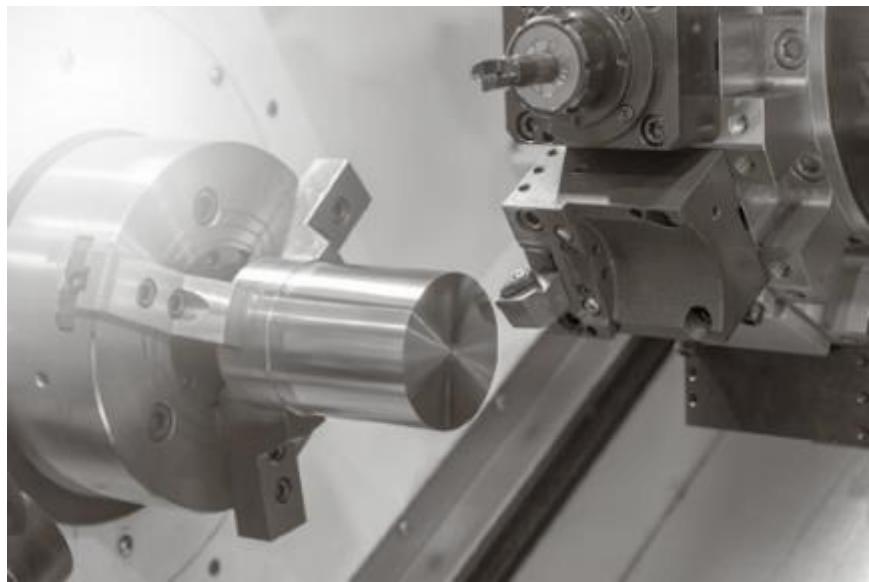
As brochadeiras, também conhecidas como chaveteiras, consistem essencialmente em um mecanismo que permite o movimento relativo entre a ferramenta, chamada brocha, e a peça a ser trabalhada, normalmente em um movimento linear, caracterizando as máquinas de

brochamento. A maioria dessas máquinas é acionada por sistemas hidráulicos, devido à grande força necessária para o processo. Existem diferentes tipos de brochadeiras: algumas comprimem a peça, outras exercem tração sobre ela, e há ainda aquelas que combinam ambas as ações, compressão e tração. Geralmente, as máquinas que realizam compressão têm orientação vertical, enquanto as que utilizam tração são horizontais. De maneira geral, as brochadeiras podem ser classificadas em dois tipos principais: verticais e horizontais.

A eletroerosão é um processo de usinagem baseado na remoção de material por descargas elétricas entre um eletrodo e a peça de trabalho, imersa em um fluido dielétrico. Esse método é particularmente eficiente para materiais de alta dureza e geometrias complexas, onde os processos convencionais apresentam limitações. Dentro desse contexto, este artigo investiga a aplicação da eletroerosão na usinagem de rasgos de chaveta, elementos fundamentais para transmissão de torque em sistemas mecânicos. O estudo busca comparar a eletroerosão com métodos tradicionais de usinagem, avaliando sua precisão, qualidade superficial e eficiência produtiva.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Lixandrão (2018) Máquinas-ferramentas são equipamentos de usinagem que provocam uma ação de desbaste, corte e conformação nos materiais. Existem diversos tipos de ferramentas inseridas nas máquinas para determinados objetivos de corte e usinagem; algumas são: pastilha de corte, brocas, fresas, rebolos, entre outras, o próprio Lixandrão (2018) cita que máquinas CNC são máquinas operatrizes utilizadas na fabricação de componentes em uma indústria em alta escala, nas quais há um controlador numérico que programa os movimentos da ferramenta ou da peça para ganhar agilidade no avanço de sua fabricação, reduzindo o setup para troca de ferramentas, em que essas máquinas geralmente estão acopladas, com um conjunto denominado de porta-ferramentas. Portanto, a sua utilização tem a finalidade específica de automatizar a produção. Na Figura 1, há a visualização de uma máquina de torneamento CNC com porta-ferramentas para troca rápida.

Figura 1: Torno CNC com porta ferramentas

Fonte: Empresa estudada (2025).

Seguindo esse conceito, a eletroerosão é um processo térmico que ocorre através de descargas elétricas controladas. Durante a usinagem, ocorre a ionização do fluido dielétrico, formando um plasma que funde e vaporiza o material da peça e do eletrodo (SPITZER, 2020). Esse processo pode ser dividido em duas principais modalidades: eletroerosão a fio (Wire EDM) e eletroerosão por penetração (Sinker EDM). Enquanto a primeira é utilizada para cortes complexos e contornos delicados, a segunda é empregada na confecção de cavidades e geometrias tridimensionais.

Os rasgos de chaveta são usinados tradicionalmente por fresamento ou brochamento. Entretanto, a eletroerosão se destaca pela capacidade de usinar materiais endurecidos sem desgaste excessivo de ferramenta (KLOCKE, 2017). Ademais, permite a usinagem de peças com geometrias complexas e dimensões reduzidas, garantindo alta precisão dimensional e um acabamento superficial superior. Além disso, a eletroerosão possibilita a produção de rasgos de chaveta com excelente repetibilidade, minimizando a variabilidade de produção e melhorando a qualidade do produto final.

2.1 Parâmetros do Processo

Fatores como corrente, tempo de pulso e tipo de eletrodo influenciam a taxa de remoção de material e o acabamento superficial da peça (LEE et al., 2019). A escolha do eletrodo, por exemplo, desempenha um papel fundamental, pois materiais como cobre e grafite apresentam

diferentes taxas de desgaste e influenciam a estabilidade do processo. Outros aspectos como a polaridade da corrente e a qualidade do fluido dielétrico também impactam diretamente a eficiência do processo e a integridade da peça usinada, sabemos que a Eletroerosão é o processo que consiste na remoção de partículas da peça a ser erodida, através da sucessão de descargas elétricas, de forma programada e periódica, entre a peça e o eletrodo, ambos imersos em um fluido dielétrico, a Figura 1, nos mostra a Característica dos materiais empregados nesse processo e a natureza de cada operação onde eles são empregados.

Figura 2 - Tipo de trabalho dos materiais empregados na Eletroerosão

MATERIAL DO ELETRODO	CARACTERÍSTICAS					TIPO DE TRABALHO				
	TEOR DO ELEMENTO DIFERENCIADOR %	TEOR DE IMPUREZAS % MAX.	DUREZA	RESISTIVIDADE ELÉTRICA A 20°C $\Omega \text{ mm}^2/\text{mm}$	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR $^{\circ}\text{C}^{-1}$	DENSIDADE kg/dm^3	DESASTE	SEMI-ACABADO	ACAB. NORMAL	ACAB. FINO
Cobre eletrolítico	Cu: 99,9	0,1	170 (HV50)	$1,7 \times 10^{-2}$	$16,5 \times 10^{-6}$	8,93	x	x	x	x
Grafite	-		45 a 75 (SHORE)	$1,3 \times 10^{-2}$ $1,7 \times 10^{-2}$	$3 \text{ a } 6 \times 10^{-6}$	1,70 a 1,85				
Cobre grafite	Cu: 25 a 35		65 a 70 (SHORE)	3×10^{-3}	-	2,75				
Cobre Tugstênio ¹⁾	W: 60 a 80	-	-	$5,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-6}	15,2				

Fonte: Empresa estudada (2025).

2.2 Vantagens e Desvantagens

A eletroerosão apresenta diversas vantagens, como a usinagem de materiais extremamente duros, ausência de forças mecânicas significativas e capacidade de reproduzir geometrias complexas com alta precisão. No entanto, algumas limitações devem ser consideradas, como o tempo de usinagem relativamente alto em comparação com processos convencionais, o desgaste do eletrodo e o consumo elevado de energia elétrica. Essas limitações tornam essencial a análise criteriosa do processo para garantir sua viabilidade econômica e produtiva.

Segundo Bley et al. (2018), a eletroerosão possui um consumo energético elevado devido à necessidade de descargas elétricas contínuas para a remoção de material. Entretanto, esse fator pode ser mitigado com a escolha adequada dos parâmetros do processo, otimizando o uso de energia e melhorando a eficiência produtiva, a taxa de desgaste do eletrodo é um dos

desafios da eletroerosão, especialmente quando materiais como cobre e grafite são utilizados (CHEN et al., 2021). Estudos demonstram que a escolha do eletrodo influencia diretamente a precisão dimensional da peça, sendo necessário um balanceamento entre a taxa de remoção de material e a degradação do eletrodo.

A eletroerosão permite um excelente acabamento superficial, reduzindo a necessidade de processos de polimento ou retrabalho. Isso a torna uma alternativa viável para aplicações em moldes, matrizes e componentes de precisão (GARCIA et al., 2020). Contudo, a formação de uma camada recast pode comprometer a integridade da peça em determinados contextos industriais, exigindo tratamentos pós-processo para garantir sua confiabilidade.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Por meio de uma revisão bibliográfica que inclui artigos técnicos e literatura especializada, busca-se fundamentar o conteúdo sobre técnicas aplicadas na prática, com ênfase no processo de usinagem por eletroerosão. O estudo foi conduzido em uma indústria do setor metalúrgico localizada no interior de São Paulo, com o objetivo de aprimorar a precisão dos parâmetros operacionais e a qualidade das peças usinadas.

Conforme destaca Gil (2002, p. 44), a pesquisa bibliográfica permite ao pesquisador obter uma visão mais ampla dos fenômenos estudados do que a pesquisa direta, tornando o estudo embasado em informações já consolidadas e reforçando a importância e viabilidade do tema investigado. Além disso, Lakatos e Marconi (2003) ressaltam que essa metodologia possibilita a identificação de lacunas no conhecimento e a compreensão aprofundada do tema, o que contribui para o desenvolvimento de novas abordagens e aplicações práticas.

A usinagem por eletroerosão tem sido amplamente utilizada na fabricação de peças complexas em materiais de alta dureza, onde os métodos convencionais de usinagem apresentam limitações. Segundo Aspinwall et al. (2008), essa técnica permite alta precisão dimensional e acabamento superficial refinado, tornando-se essencial em setores como aeroespacial, automotivo e biomédico. A escolha dos parâmetros do processo, como corrente elétrica, tempo de pulso e taxa de remoção de material, influencia diretamente a eficiência da usinagem e a integridade superficial da peça (KLOCKE; SCHNEIDER, 2018).

Além disso, estudos recentes apontam que a otimização dos fluidos dielétricos utilizados no processo pode reduzir o desgaste do eletrodo e melhorar a taxa de remoção de material. De acordo com Kumar et al. (2019), a aplicação de fluidos dielétricos de base ecológica apresenta benefícios ambientais e melhora a estabilidade térmica do processo, reduzindo os efeitos da

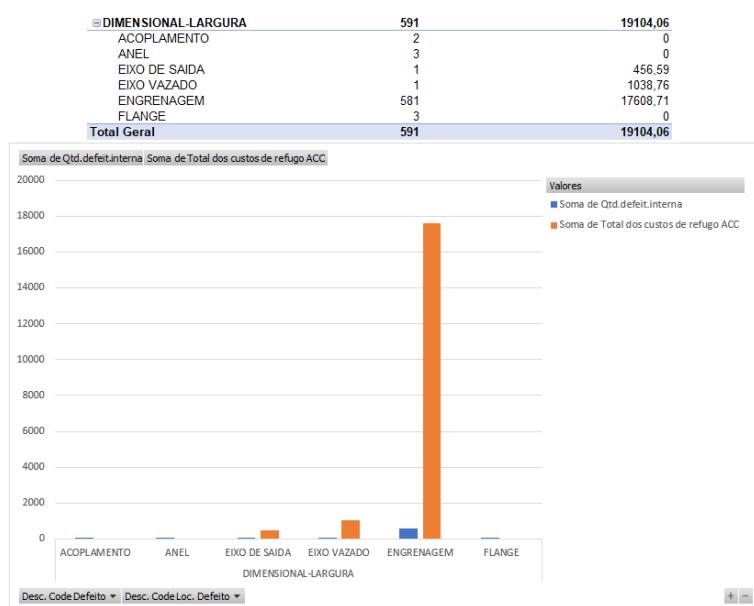
erosão térmica excessiva. Essas inovações estão alinhadas às diretrizes da Indústria 4.0, que enfatiza o uso de tecnologias avançadas para aumentar a eficiência e a sustentabilidade dos processos produtivos (SCHWAB, 2016).

Dessa forma, ao embasar o estudo na literatura especializada e em metodologias já validadas, busca-se contribuir para a ampliação do conhecimento sobre a usinagem por eletroerosão e suas aplicações industriais. A pesquisa visa, portanto, não apenas reforçar a relevância dessa tecnologia, mas também destacar sua importância na produção de peças de alta complexidade, promovendo maior precisão e eficiência operacional, garantindo os níveis de qualidade

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de eletroerosão CNC foi implementado na empresa estudada no início do ano de 2024, resultando em melhorias significativas na qualidade e eficiência produtiva. Antes da adoção dessa tecnologia, a manufatura era realizada por meio de máquinas operatrizes convencionais, que apresentavam menor precisão em comparação com a eletroerosão CNC. Segundo Semprebon e Marinho (2018), a eletroerosão permite maior controle dimensional e redução de erros geométricos, o que justifica a expressiva diminuição no índice de refugos observada na empresa estudada. Além disso, a padronização dos materiais foi otimizada, eliminando a necessidade de ferramentas específicas para cada modelo de peça, o que corrobora com os princípios de usinagem eficiente descritos por Groover (2020).

Figura 3 – Custos com retrabalho e refugo de engrenagens em brochadeiras manuais



Fonte: Empresa estudada (2025).

A normatização do processo produtivo contribuiu diretamente para a capacitação dos colaboradores, proporcionando um aprendizado mais rápido e eficaz. De acordo com a norma ISO 9001:2015 (ABNT, 2015), a padronização dos processos industriais melhora a previsibilidade dos resultados e reduz a variabilidade produtiva, o que foi observado na empresa após a implementação da eletroerosão CNC. Desde essa mudança, os custos com refugo e retrabalho foram reduzidos a zero, evidenciando a alta eficiência do processo. Após a curva de aprendizagem inicial, não foram identificados problemas operacionais, o que demonstra a confiabilidade e a estabilidade do método adotado (Norton, 2020).

Além disso, a padronização do processo possibilitou um treinamento mais eficiente e facilitou a integração de novos colaboradores, aspecto essencial diante da alta rotatividade de funcionários na empresa. Conforme Groover (2020), processos altamente automatizados, como a eletroerosão CNC, reduzem a dependência da habilidade manual do operador, tornando a operação mais intuitiva e menos suscetível a falhas humanas. Dessa forma, a eletroerosão CNC demonstrou ser uma alternativa altamente eficaz, pois, diferentemente dos métodos convencionais, exige menos intervenção manual e apresenta um nível elevado de automação, tornando o processo produtivo mais ágil e preciso (Semprebon; Marinho, 2018).

Figura 4 – Norma do posto de trabalho

		OPERAR ELETROEROSÃO		WPS-60301 PT																			
		BR-SP-M		M1-DEP Produção Rev. 00																			
1. EPI'S																							
 Luvas de Látex ou Luvas nitrílica contra agentes mecânicos e químicos.  Protetor auricular  Óculos de proteção  Calçado de segurança  Creme de proteção para a pele																							
2. PROCEDIMENTO																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITENS DE VERIFICAÇÃO</th> <th>FREQÜÊNCIA MÍNIMA</th> <th>INSTRUMENTO OU MÉTODO DE MEDIDAÇÃO</th> <th>CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO</th> <th>DISPOSIÇÃO PARA CARACTERÍSTICA NÃO CONFORME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Verificar relatório de produção</td> <td>A cada preparação</td> <td>Visual</td> <td>Iniciar as ordens de produção conforme data ou priorização do supervisor.</td> <td rowspan="3">Caso haja divergências durante o processo, deverá ser comunicado ao preparador.</td> </tr> <tr> <td>Instrumento de medição.</td> <td>Início do turno</td> <td></td> <td>Conforme ordem de produção</td> </tr> <tr> <td>Aferição dos instrumentos de medição.</td> <td>- Início do turno; - Retorno da refeição; - Após choque acidental; - Quando detectar não conformidade.</td> <td>Metronómetro horizontal de medição tímpos</td> <td>Devem estar conforme indicação do padrão de referência.</td> </tr> </tbody> </table>						ITENS DE VERIFICAÇÃO	FREQÜÊNCIA MÍNIMA	INSTRUMENTO OU MÉTODO DE MEDIDAÇÃO	CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO	DISPOSIÇÃO PARA CARACTERÍSTICA NÃO CONFORME	Verificar relatório de produção	A cada preparação	Visual	Iniciar as ordens de produção conforme data ou priorização do supervisor.	Caso haja divergências durante o processo, deverá ser comunicado ao preparador.	Instrumento de medição.	Início do turno		Conforme ordem de produção	Aferição dos instrumentos de medição.	- Início do turno; - Retorno da refeição; - Após choque acidental; - Quando detectar não conformidade.	Metronómetro horizontal de medição tímpos	Devem estar conforme indicação do padrão de referência.
ITENS DE VERIFICAÇÃO	FREQÜÊNCIA MÍNIMA	INSTRUMENTO OU MÉTODO DE MEDIDAÇÃO	CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO	DISPOSIÇÃO PARA CARACTERÍSTICA NÃO CONFORME																			
Verificar relatório de produção	A cada preparação	Visual	Iniciar as ordens de produção conforme data ou priorização do supervisor.	Caso haja divergências durante o processo, deverá ser comunicado ao preparador.																			
Instrumento de medição.	Início do turno		Conforme ordem de produção																				
Aferição dos instrumentos de medição.	- Início do turno; - Retorno da refeição; - Após choque acidental; - Quando detectar não conformidade.	Metronómetro horizontal de medição tímpos	Devem estar conforme indicação do padrão de referência.																				
2.1. PREPARAR MÁQUINA																							
SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES O QUE FAZER?		COMO FAZER?		PONTOS IMPORTANTES	FIGURA																		
Avaliar o processo de fabricação da peça.		<ul style="list-style-type: none"> - Verificando a descrição do processo na ordem de produção. - Conferindo as medidas da peça, relacionadas a operação de eletroerosão a fio para certificar se estão conforme desenho. 		<ul style="list-style-type: none"> Caso tenha divergências de informações ou medidas, açãone o preparador. 																			

Fonte: Empresa estudada (2025).

5. CONCLUSÃO

presente estudo teve como objetivo investigar a aplicação da eletroerosão CNC na usinagem de rasgos de chaveta, comparando-a com métodos tradicionais, como o fresamento e o brochamento. A pesquisa demonstrou que a eletroerosão apresenta vantagens significativas, incluindo maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e a possibilidade de usinar materiais de elevada dureza sem desgaste excessivo das ferramentas.

Os resultados obtidos na empresa estudada evidenciaram que a implementação da eletroerosão CNC proporcionou uma expressiva redução no índice de refugos e custos com retrabalho, tornando o processo altamente eficiente. A padronização operacional, baseada em normas técnicas, contribuiu para a melhor capacitação dos colaboradores e facilitou a integração de novos funcionários, um fator essencial diante da alta rotatividade da equipe. Além disso, a automação do processo reduziu a necessidade de intervenção manual, minimizando erros operacionais e aumentando a produtividade.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas, como o tempo relativamente alto de usinagem em comparação com os métodos convencionais e o elevado consumo de energia elétrica. Essas desvantagens ressaltam a necessidade de otimização dos parâmetros do processo, como a escolha do eletrodo e a configuração da corrente elétrica, para garantir um melhor equilíbrio entre eficiência e viabilidade econômica.

Para pesquisas futuras, sugere-se explorar novas abordagens para reduzir o desgaste do eletrodo e aumentar a eficiência energética do processo de eletroerosão. Além disso, estudos adicionais podem avaliar a aplicação de fluidos dielétricos ecologicamente sustentáveis, alinhados às diretrizes da Indústria 4.0. Outra recomendação é investigar a viabilidade da eletroerosão CNC para a produção de peças em larga escala, analisando sua competitividade frente a métodos convencionais em diferentes segmentos industriais.

Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre a usinagem por eletroerosão, demonstrando sua relevância na produção de peças de alta complexidade e precisão, além de destacar a importância da automação na otimização dos processos produtivos.

REFERÊNCIAS

ASPINWALL, D. K. et al. **Electrical discharge machining of advanced aerospace alloys.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 48, n. 3-4, p. 222-232, 2008.

ABNT. NBR ISO 9001:2015 – **Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BLEY, P.; ZIMMERMANN, F.; SCHMIDT, L. Energy Consumption in EDM Processes. *Journal of Manufacturing Science*, v. 36, p. 89-102, 2018.

CHEN, Y. et al. "Electrode Wear and Dimensional Accuracy in EDM Machining." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 110, p. 45-58, 2021.

GARCIA, J.; PEREIRA, M.; ALMEIDA, R. Surface Finish and Integrity in EDM Applications. *Precision Engineering Journal*, v. 75, p. 120-135, 2020.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems.** 7th ed. Hoboken: Wiley, 202.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting.** Springer, 2017. LEE, H. T. et al. "Influence of EDM Parameters on Surface Integrity of Tool Steels." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 265, p. 52-60, 2019.

KLOCKE, F.; SCHNEIDER, S. Technological and ecological aspects in electro discharge machining. *CIRP Annals*, v. 67, n. 1, p. 199-222, 2018.

KUMAR, S. et al. **Advancements in eco-friendly dielectric fluids for EDM: A review.** *Journal of Manufacturing Processes*, v. 38, p. 426-444, 2019.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

NORTON, R. L. **Machine Design: An Integrated Approach.** 6th ed. Boston: Pearson, 2020.

SPITZER, D. "Fundamentals of Electrical Discharge Machining." *Precision Engineering Journal*, v. 62, p. 45-58, 2020.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial.** São Paulo: Edipro, 2016.

SEMPREBON, E.; MARINHO, M. A. **Usinagem por Eletroerosão: Fundamentos e Aplicações.** São Paulo: Blucher, 2018.