

ANÁLISE DO ELETRODO DE COBRE ELETROLÍTICO E DO ELETRODO DE GRAFITE PARA ELETROEROSÃO NA SUPERFÍCIE DO AÇO P20

Bianca Marinho da Silva⁽¹⁾ (bmds.emt20@uea.edu.br), Joaquim Souza de Oliveira⁽¹⁾ (jso.emt18@uea.edu.br), Isaac Aurelio Texeira Monteiro⁽¹⁾ (iatm.emt20@uea.edu.br), Carlos Augusto da Silva Alves⁽¹⁾ (cadsa.emt20@uea.edu.br), Denilson Luan Oliveira Correa⁽¹⁾ (dloc.emt20@uea.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade do estado do Amazonas (UEA); Departamento de Engenharia de Materiais

RESUMO: A fabricação seriada de peças moldadas por injeção é uma tarefa de usinagem exigente, especialmente em termos de precisão e qualidade das superfícies. Moldes de injeção são produzidos por processos de usinagem e EDM. O aço P20 é amplamente utilizado devido às suas ótimas propriedades mecânicas, como boa tenacidade e estabilidade dimensional, sendo ideal para moldes de injeção de plástico e matrizes de fundição sob pressão. Na produção de cavidades e insertos, ferramentas de desbaste e acabamento por fresagem possuem limitações que impedem o acabamento superficial pela usinagem convencional. Detalhes complexos e materiais duros exigem a utilização de EDM. Durante a definição dos detalhes da superfície, programadores enfrentam desafios técnicos que afetam a qualidade, custo e produtividade. A escolha entre eletrodos de cobre ou grafite é uma incógnita que pode influenciar a eficiência produtiva. Este trabalho propõe um método para definir a escolha do eletrodo, considerando custo e confiabilidade no projeto, fabricação e uso, visando o menor custo, risco e melhor acabamento superficial em aço P20. Baseado em estimativas de custo do material e tempo de usinagem, o método mostrou-se objetivo, rápido, de baixo custo e alta qualidade, conforme análises de tempo, custo e confiabilidade do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem por Descarga Elétrica (EDM), Aço P20, Eletrodos de Cobre e Grafite, Acabamento Superficial, Eficiência Produtiva.

ANALYSIS OF ELECTROLYTIC COPPER ELECTRODE AND GRAPHITE ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING ON P20 STEEL SURFACE

ABSTRACT: Mass production of injection molded parts is a demanding machining task, especially in terms of surface precision and quality. Injection molds are produced through machining and EDM processes. P20 steel is widely used due to its excellent mechanical properties, such as good toughness and dimensional stability, making it ideal for plastic injection molds and die-casting molds. In the production of cavities and inserts, roughing and finishing milling tools have limitations that prevent surface finishing by conventional machining. Complex details and hard materials require the use of EDM. During the definition of surface details, programmers face technical challenges that affect quality, cost, and productivity. The choice between copper or graphite electrodes is an uncertainty that can influence productive efficiency. This work proposes a method to define electrode selection, considering cost and reliability in design, manufacturing, and use, aiming for the lowest cost, risk, and best surface finish on P20 steel. Based on estimates of material cost and machining time, the method proved to be objective, fast, low-cost, and high-quality, as shown by analyses of process time, cost, and reliability.

KEYWORDS: Electrical Discharge Machining (EDM), P20 Steel, Copper and Graphite Electrodes, Surface Finish, Productive Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A eletroerosão (Electrical Discharge Machining - EDM) é uma técnica amplamente utilizada na indústria de moldes e matrizes devido à sua capacidade de usinar materiais extremamente duros e de criar geometrias complexas com alta precisão (Sonker *et al.* 2022^a). O processo de EDM é baseado na erosão do material da peça de trabalho através de descargas elétricas controladas entre um eletrodo e a peça imersa em um líquido dielétrico. Esse método é especialmente valioso para a fabricação de componentes que exigem tolerâncias rigorosas e acabamentos superficiais de alta qualidade (Mercer, 2014).

A EDM é um processo de usinagem não convencional que utiliza descargas elétricas para remover material de uma peça de trabalho. Este processo é amplamente utilizado na fabricação de moldes, matrizes e componentes aeroespaciais e automotivos devido à sua capacidade de manter a precisão dimensional e a resistência ao desgaste (Mohanty *et al.* 2017). A EDM é eficaz para usinar materiais condutores de eletricidade, independentemente de sua dureza e resistência, tornando-se uma escolha ideal para a usinagem de ligas resistentes ao calor e materiais compósitos (Rao *et al.* 2021). A técnica evoluiu para incluir a Wire EDM (WEDM), que é particularmente útil para cortar formas complexas e perfis precisos em materiais condutores (Vijaya e Soni, 2018).

A fabricação de moldes para produção seriada de peças injetadas representa uma das tarefas de usinagem mais exigentes, principalmente no que diz respeito à precisão e à qualidade das superfícies usinadas. Para tanto, os moldes de injeção são usualmente produzidos através dos processos de usinagem e de eletroerosão (Weinert e Guntermann, 2000). O aço P20 é um aço ferramenta amplamente utilizado na indústria de moldes e matrizes, conhecido por sua excelente usinabilidade e boa polibilidade; suas propriedades incluem uma combinação de resistência ao desgaste, tenacidade e capacidade de ser endurecido superficialmente, tornando-o ideal para a produção de moldes de injeção de plástico e componentes estruturais de alta resistência (Corazza, 2012). As características do aço P20 fazem dele um material preferido para aplicações onde a precisão e a durabilidade são cruciais.

O desempenho da EDM é fortemente influenciado pelo material do eletrodo. Eletrodos de cobre eletrolítico proporcionam um acabamento superficial mais liso e menor desgaste da ferramenta em comparação com o grafite, que, apesar de oferecer uma taxa de remoção de material (MRR) mais alta, tende a resultar em uma rugosidade superficial maior e uma camada branca mais espessa (Sonker *et al.* 2022^b; Zhu *et al.* 2018). Estudos mostram que o grafite pode causar maior formação de microfissuras e defeitos na camada recast, impactando negativamente a integridade superficial da peça usinada (Dewangan *et al.* 2014). Além disso, a escolha do material do eletrodo pode afetar significativamente a taxa de desgaste do eletrodo (TWR), com o cobre geralmente apresentando menor TWR em comparação com o grafite (Selvarajan, 2018).

Variáveis como a corrente de descarga, o tempo de pulso e a voltagem têm um impacto significativo nos resultados da EDM. O aumento da corrente de descarga tende a aumentar a MRR, mas também pode deteriorar a qualidade da superfície (Rao *et al.* 2021). A escolha do fluido dielétrico também é crucial para a eficiência do processo e a formação da camada branca (Zhu *et al.* 2018). A otimização desses parâmetros é fundamental para alcançar um equilíbrio entre a taxa de remoção de material e a qualidade do acabamento superficial. Estudos como o de Selvarajan *et al.* (2019) demonstram a importância de ajustar corretamente os parâmetros de EDM para minimizar defeitos como fissuras térmicas e porosidades. A metodologia de superfície de resposta (RSM) tem sido usada para modelar e otimizar parâmetros de EDM, destacando a importância da corrente de pico e do tempo de pulso na determinação da rugosidade superficial (Asghar *et al.* 2019).

A EDM gera partículas e subprodutos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente. Estudos recentes têm focado em métodos para tornar o processo EDM mais sustentável, reduzindo os impactos ambientais e melhorando a eficiência energética do processo (Sonker *et al.* 2022^b). A utilização de fluidos dielétricos ecológicos e a otimização dos parâmetros de usinagem são estratégias promissoras para minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente (Rao *et al.* 2021).

Métodos como a metodologia de superfície de resposta (RSM) e a otimização de enxame de partículas (MOPSO) têm sido utilizados para otimizar os parâmetros da EDM, visando melhorar a MRR e a qualidade da superfície, ao mesmo tempo em que minimizam o desgaste da ferramenta (Mohanty *et al.* 2014). Essas abordagens permitem a identificação das condições ideais de processamento para maximizar a eficiência e a qualidade do processo EDM. O estudo de Vijaya e Soni (2018) emprega a técnica Taguchi para otimizar os parâmetros de EDM, mostrando que a corrente, o tempo de pulso e a voltagem são críticos para o desempenho do processo. A análise de variância (ANOVA) também tem sido utilizada para identificar os parâmetros mais significativos, com a corrente sendo frequentemente destacada como o principal fator influente na rugosidade superficial (Sakthivelu *et al.* 2020).

Durante o processo de definição dos detalhes da superfície em que serão necessários eletrodos, surgem dúvidas ao programador de como erodir tais regiões. As dificuldades desta operação são critérios de ordem técnica que afetam a qualidade, o custo e a produtividade do processo. Uma dessas incógnitas é a definição se com o uso de um eletrodo eletrolítico de cobre ou eletrodo de grafite, pode-se atingir maior eficiência no processo produtivo.

Assim, este artigo tem o objetivo de analisar a eficácia dos eletrodos de cobre e grafite eletrolítico na EDM da superfície do aço P20, focando na qualidade do acabamento superficial, na taxa de remoção de material e nas alterações microestruturais resultantes. Através da compreensão e otimização dos parâmetros de processo, busca-se aprimorar a eficiência e a sustentabilidade da EDM, alinhando-se às demandas modernas de precisão e responsabilidade ambiental.

1.1 Objetivos

Avaliar irregularidades geométricas da superfície;

- Avaliar alterações metalúrgicas da superfície e da camada subsuperficial;
- Avaliar micropartículas de metal da ferramenta usinada;
- Realizar o processo de usinagem das amostras do aço P20, além da separação dos eletrodos;
- Produzir peças erodidas (Acabamento Superficial) em DOZE amostras diferentes após pesquisa bibliográfica;
- Avaliar o melhor eletrodo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

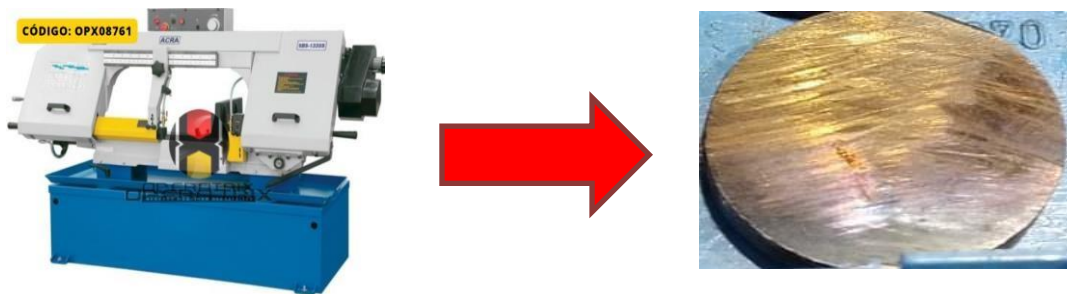
- Amostras de Aço P20: Placas cilíndricas de aço P20 com dimensões de 50 mm de diâmetro por 10 mm espessura.
- Eletrodos: Eletrodos de cobre e grafite com dimensões padrão de 10 mm x 10 mm x 50 mm. As amostras de cobre e grafite foram orçadas e compradas de fornecedores locais da cidade de Manaus.
- Máquinas: Serra de fita horizontal modelo sbs-1335, Torno mecânico Romi id20, Retífica plana sulmecânica raph - 400mm x 1000mm.
- Máquina de EDM: Máquina de eletroerosão por penetração, modelo XYZ-123, fornecida por uma empresa do polo industrial da cidade de Manaus, com capacidade para realizar usinagem com eletrodos de diferentes materiais.
- Líquidos Dielétricos: Fluido dielétrico padrão.
- Detector de Energia Dispersiva (EDS): Utilizado para analisar alterações metalúrgicas na superfície e na camada subsuperficial.
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Utilizado para análise microestrutural das superfícies usinadas.

2.1 Produção das amostras do metal P20

Para a elaboração deste trabalho, foi realizada uma pesquisa experimental, na qual foram utilizadas doze amostras de peças, todas confeccionadas em aço P20.

As Peças foram cortadas utilizando uma serra de fita a partir de tarugos de aço P20 com 25 mm de diâmetro, conforme exemplificado na Figura 1.

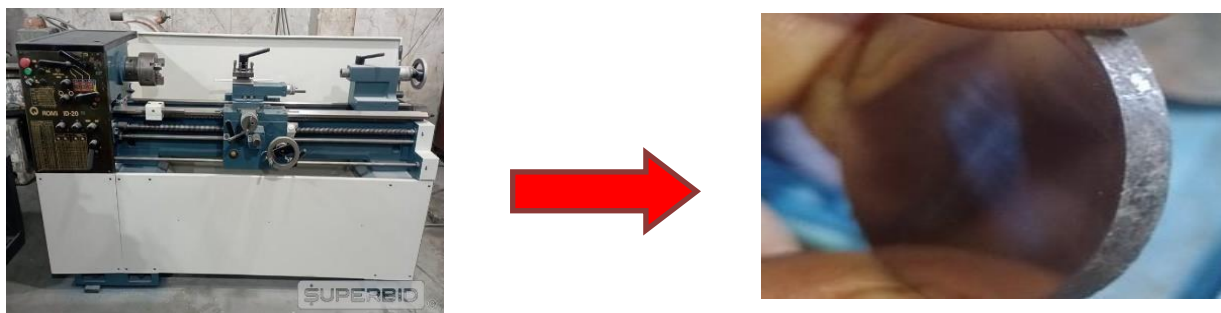
FIGURA 1. Serra de fita horizontal modelo sbs-1335 s e amostra do aço P20 cortada.



Fonte: Autor (2024).

Após cortadas, as peças passaram por processos de usinagem de torneamento em trono mecânico, conforme ilustrado na Figura 2.

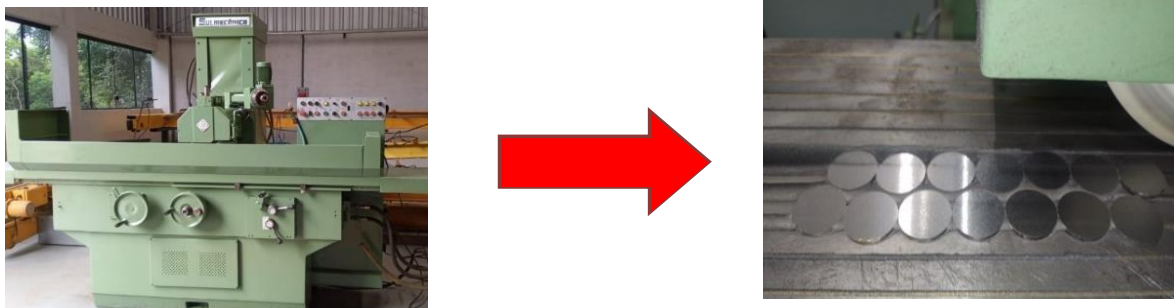
FIGURA 2. Torno mecânico Romi id20 e amostra do aço P20 torneada.



Fonte: Autor (2024).

E em seguida passaram por retificação em retífica plana, conforme mostrado na Figura 3.

FIGURA 3. Retifica plana sulmecânica raph - 400mm x 1000mm e amostras do aço P20 retificadas.



Fonte: Autor (2024).

Após esses passos, as amostras passaram por erosão à penetração, utilizando como ferramentas de desbaste o cobre eletrolítico e eletrodo de grafite.

2.2 Procedimento de usinagem com eletrodos de cobre e grafite

O processo de usinagem foi realizado utilizando a máquina de EDM, conforme Figura 4, seguindo os parâmetros de usinagem específicos para cada tipo de eletrodo:

FIGURA 4. Erosão a penetração convencional ENGEMAQ, Modelo: 840ZNC.



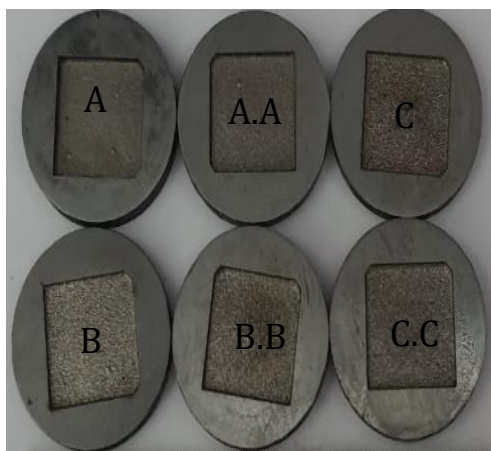
Fonte: Autor (2024).

Cada amostra de aço P20 foi usinada com ambos os eletrodos, utilizando os mesmos parâmetros de usinagem para garantir a comparabilidade dos resultados.

2.3 Técnicas de avaliação das superfícies usinadas e caracterização.

A Figura 5 mostra seis peças erodidas por eletrodo de grafite com acabamentos A, AA (0.20); B, BB (0.30); C, CC (0.40).

FIGURA 5. Amostras de peças erodidas por eletrodo de grafite.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 6 mostra seis peças erodidas por eletrodo de cobre com acabamentos A, AA (0.20); B, BB (0.30); C, CC (0.40).

FIGURA 6. Amostras de peças erodidas por eletrodo de cobre.



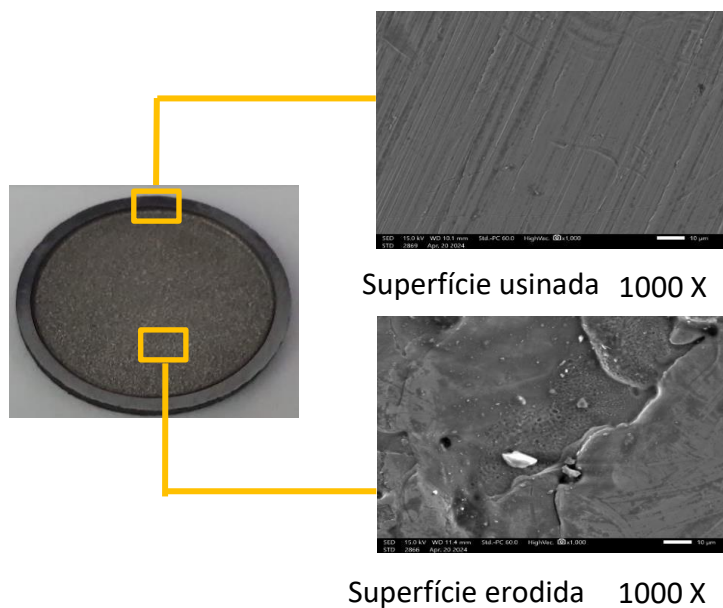
Fonte: Autor (2024).

3. RESULTADOS

- Análises MEV-EDS (Cobre e Grafite)

A Figura 7 mostra o ensaio de MEV com EDS da superfície de cobre, que não apresentou trincas ou irregularidades superficiais por conta do eletro erosão.

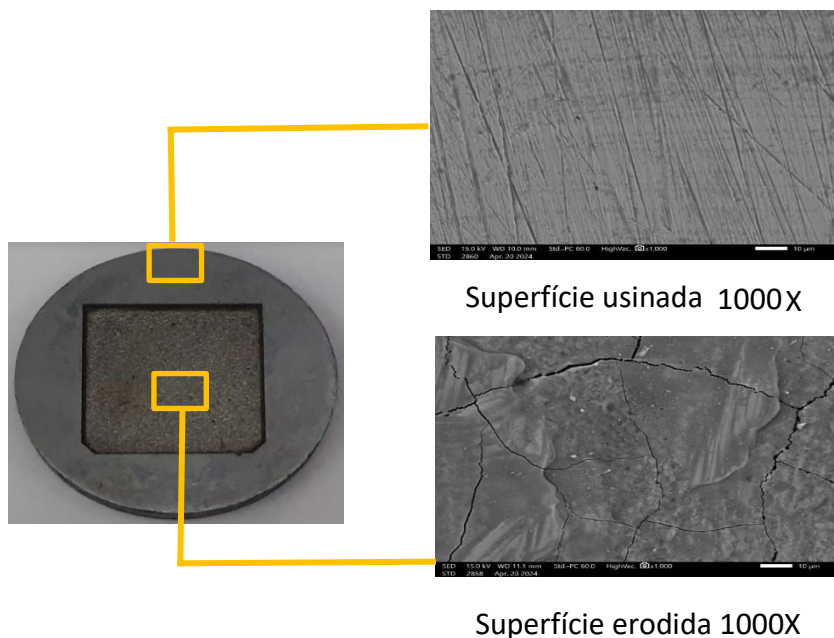
FIGURA 7. Peças erodidas por cobre analisadas por MEV-EDS.



Fonte: Autor (2024).

Conforme mostra a Figura 8 no ensaio de MEV com EDS, foi observado a nucleação de micro trincas na superfície erodida com eletrodo de grafite.

FIGURA 8. Peças erodidas por grafite analisadas por MEV-EDS.



Fonte: Autor (2024).

- **Análises de microscopia óptica (Grafite e Cobre)**

Na realização da microscopia óptica da amostra erodida por cobre, conforme ilustrado na Figura 9, não apresentou anomalias e nota-se a presença de camada branca na superfície da amostra. Camada branca variando entre 0,012 a 0,022 mm.

FIGURA 9. Peças erodidas por cobre analisadas por microscópio óptico.



Superfície sem usinagem com ampliação de 500x

Superfícies erodidas com ampliação de 500x

Fonte: Autor (2024).

Na realização da microscopia óptica da amostra erodida por grafite, conforme ilustrado na Figura 10, não apresentou anomalias e a superfície apresentou camada branca uniforme. Camada branca variando 12,677 a 15,026 μm .

FIGURA 10. Peças erodidas por eletrodo de grafite analisadas por microscópio óptico.



Superfície sem usinagem com ampliação 500x



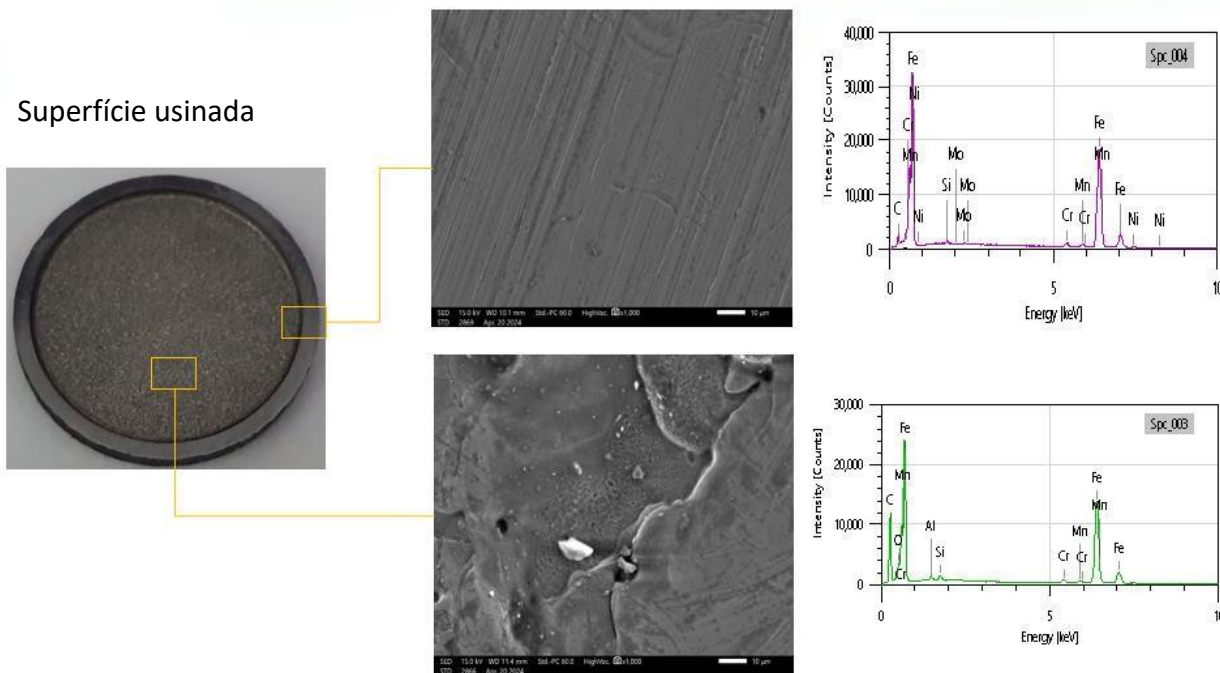
Superfícies erodidas com ampliação de 500x



Fonte: Autor (2024).

A Figura 11 mostra a verificação da característica química das peças usinadas e erodidas de cobre. Conforme a Tabela 1 o nível de carbono da peça usinada é de 3.48 ± 0.02 %, e, na Tabela 2, o nível de carbono da peça erodida é de 16.14 ± 0.04 %.

FIGURA 11. Peças erodidas por eletrodo de cobre analisadas por MEV-EDS.



Fonte: Autor (2024).

TABELA 1. Caracterização química da parte usinada da peça erodida por cobre – superfície.

Spc_004	Fitting ratio 0.0072
Elemento	Mass (%)
C	3.48±0.02
Si	0.36±0.01
Cr	1.95±0.03
Mn	1.61±0.04
Fe	91.21±0.23
Ni	0.98±0.04
Mo	0.41±0.03
Total	100.00

Fonte: Autor (2024).

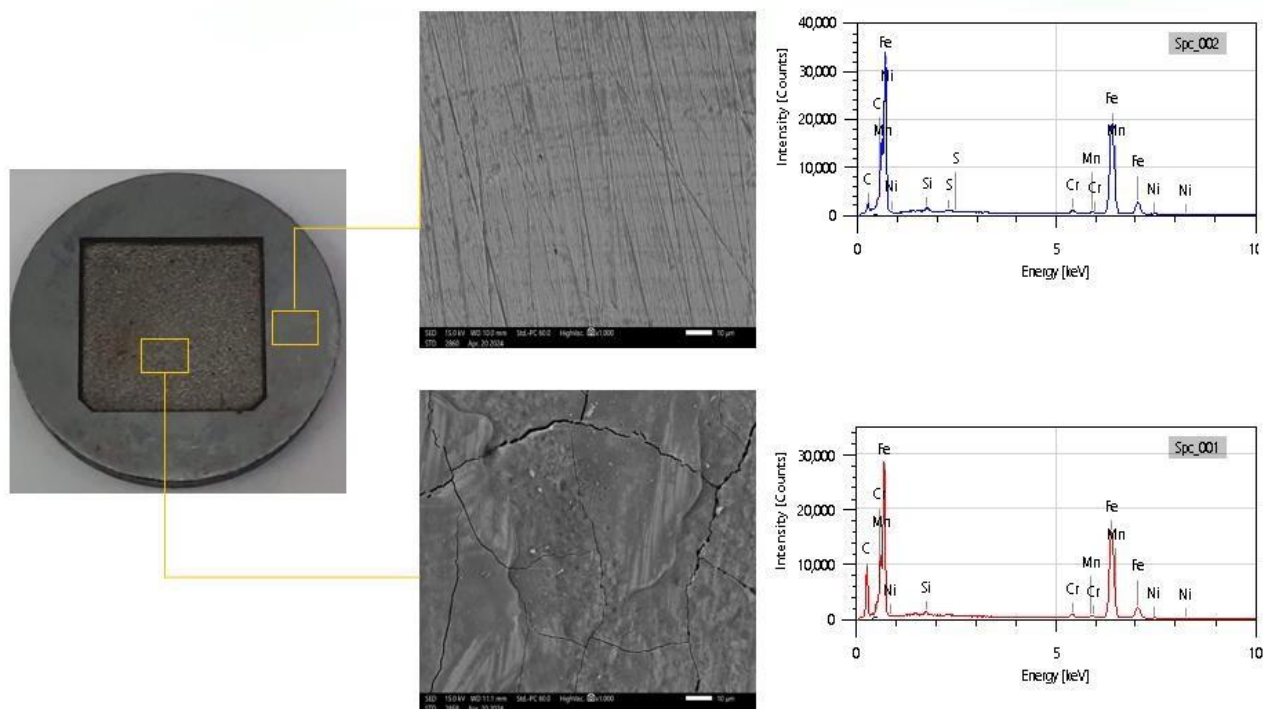
TABELA 2. Caracterização química da parte erodia da peça erodida por cobre -Superfície.

Spc_001	Fitting ratio 0.0347
Elemento	Mass (%)
C	16.14±0.04
Si	0.37±0.01
Cr	1.71±0.03
Mn	1.47±0.04
Fe	79.69±0.21
Ni	0.62±0.04
Total	100.00

Fonte: Autor (2024).

A Figura 12 mostra a verificação da característica química das peças usinadas e erodidas por grafite. Conforme a Tabela 3, o nível de carbono da peça usinada é de 3.34±0.02 %, e, na Tabela 4, o nível de carbono da peça erodida é de 20.58±0.05 %.

FIGURA 12. Peças erodidas por eletrodo de cobre analisadas por MEV-EDS.



Fonte: Autor (2024).

TABELA 3. Caracterização química da parte usinada da peça erodida por grafite – superfície.

Spc_002	Fitting ratio 0.0072
Elemento	Mass (%)
C	3.34±0.02
Si	0.35±0.01
S	0.11±0.01
Cr	1.88±0.03
Mn	1.79±0.04
Fe	91.69±0.22
Ni	0.84±0.04
Total	100.00

Fonte: Autor (2024).

TABELA 4. Caracterização química da parte erodia da peça erodida por grafite – superfície.

Spc_003	Fitting ratio 0.0442
Elemento	Mass (%)
C	20.58±0.05
O	2.03±0.02
Al	0.41±0.01
Si	0.47±0.01
Cr	1.58±0.03
Mn	1.41±0.04
Fe	73.52±0.21
Total	100.00

Fonte: Autor (2024).

Em termos de eletrodo , o eletrodo de grafite por ter em sua área superficial reduzida por conta da porosidade propicia o surgimento de pontos quentes visto que sua área de contato em relação a eletrodos de cobre é notavelmente menor, a descarga elétrica em eletrodos de grafite que estão suscetíveis ao coalescimento de vazios diminuindo a secção transversal do eletrodo, tendo então má distribuição da descarga elétrica e que por sua vez regiões com maiores temperaturas afetadas e outras regiões inalteradas, isto explica o surgimento de trincas de formas de propagação esferoidais.

Outra característica importante que induz o surgimento de trincas é a elevação de teor de carbono superficial para eletrodos de grafite, onde o metal base aproveita o momento de descarga elétrica para causar cementação superficial.

Então temos um comportamento termo mecânico de dilatação e contração alternadas relacionado ao aquecimento causado pela descarga elétrica cíclica e pausada para circulação de fluido dielétrico.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se no presente trabalho evidências claras de um melhor acabamento superficial isento de microtrincas proveniente de uma excelente área de contato da descarga elétrica que o eletrodo de cobre pode proporcionar, o correto preset de máquina também corrobora para o perfeito procedimento de usinagem por EDM, comprovado em qualidade superficial observada nas imagens de MEV.

Os resultados deste trabalho que tiveram como objetivo analisar eletrodos de cobre eletrolítico e de grafite eletrolítico, trouxeram resultados no que tange a características distintas de acabamento final de usinagem por eletroerosão e que por sua vez podem nortear sobre sua melhor aplicabilidade em termos de características de comportamento das descargas elétricas, o que implica diretamente nos processos de fabricação, por eletroerosão por penetração.

Através das características finais analisadas conclui-se que os eletrodos de grafite propiciam ao material eletroerodido um acabamento mais facetado e com apresentação de microtrincas que não são desejáveis pois as mesmas para uma superfície final podem ser suscetíveis uma falha suscetível por fadiga, por outro lado eletrodos de cobre conseguem proporcionar de forma superficial um acabamento sem trincas resultando em uma superfície suavizada, o que por sua vez elimina riscos de propagação de trincas que estariam sendo causadas no processo de eletroerosão.

REFERÊNCIAS

ASGHAR, S. et al. ScienceDirect Modeling of Surface Roughness of AISI 4340 Using CopperTungsten Tool in Die Sinking EDM. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.sciencedirect.com>.

CORAZZA, E. J. Influência do tratamento de nitretação em cavidades de aço p20 de moldes de injeção de termoplásticos. Joinville: [s.n.].

DEWANGAN, S.; BISWAS, C. K.; GANGOPADHYAY, S. Influence of different tool electrode materials on EDMed surface integrity of AISI P20 tool steel. Materials and Manufacturing Processes, v. 29, n. 11–12, p. 1387–1394, 20 dez. 2014.

MERCER, J. The Search Continues: Graphite or Copper, Which to Choose? [s.l: s.n.].

MOHANTY, C. P.; MAHAPATRA, S. S.; SINGH, M. R. An Experimental Investigation of Machinability of Inconel 718 in Electrical Discharge Machining. Procedia Materials Science, v. 6, p. 605–611, 2014.

MOHANTY, C. P.; MAHAPATRA, S. S.; SINGH, M. R. An intelligent approach to optimize the EDM process parameters using utility concept and QPSO algorithm. Engineering Science and Technology, an International Journal, v. 20, n. 2, p. 552–562, 1 abr. 2017.

RAO, M. et al. Effect of wire electrode discharge machining process parameters on the surface roughness, hardness, and microstructure of the high carbon steels. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 2021.

SAKTHIVELU, S. et al. Prediction of optimum electric discharge machining parameters for AA7075SiC composites. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 1 jan. 2020.

SELVARAJAN; KASTHURI N. INVESTIGATION ON EDM OF SS316 ALLOY MATERIAL USING COPPER ELECTRODE FOR IMPROVING MRR AND TWRJournal of Manufacturing Engineering. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.smenec.org>.

SELVARAJAN, L. et al. An experimental investigations and optimization of performance measures in EDM using copper and graphite electrodes. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 2019.

SONKER, P. K.; NAHAK, B.; JACKSON SINGH, T. Comparative study of copper and graphite electrodes performance in Electrical Discharge Machining (EDM) of die steel. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 1 jan. 2022a.

SONKER, P. K.; NAHAK, B.; JACKSON SINGH, T. Comparative study of copper and graphite electrodes performance in Electrical Discharge Machining (EDM) of die steel. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 1 jan. 2022b.

WEINERT, K.; GUNTERMANN, G. Usinagem de superfícies complexas. Máquinas e Metais, São Paulo, v. 36, n. 415, p. 18-27, 2000

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.