

Otimização e análise dos parâmetros de usinagem por eletroerosão na rugosidade superficial do aço AISI P20

Optimization and analysis of machining parameters by EDM on the surface roughness of AISI P20 steel

Artur da Silva Rossetto¹ , William Haupt¹, Luiz Ailton Consalter¹

¹Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Laboratório de máquinas operatrizes e usinagem. São José, 99042-800, Passo Fundo, RS, Brasil.

e-mail: 91403@upf.br, williamhaupt@upf.br, lac@upf.br

RESUMO

Esta pesquisa experimental tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros elétricos da usinagem por eletroerosão (EDM – *Electrical Discharge Machining*) na rugosidade média (R_a) do aço AISI P20, o qual é vastamente utilizado na indústria de moldes para injeção de termoplásticos. Também é proposto neste estudo a otimização destes parâmetros para a obtenção da rugosidade superficial pretendida ao material. O planejamento e os resultados estatísticos foram obtidos através da metodologia de design de experimento (DOE – *Design Of Experiments*). Utilizou-se do software *Statistica* para criar gráficos e tabelas de análise baseados na metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*). A análise dos resultados mostrou que a duração do pulso de descarga (T_{on}) e a intensidade da corrente elétrica são os parâmetros de maior efeito para a rugosidade superficial. Baseados em outros trabalhos sobre EDM, a análise estatística apresentou resultados em conformidade quanto a influência dos fatores. O gráfico de otimização indicou coerentemente os níveis adequados de ajuste dos parâmetros para a obtenção da variável resposta desejável. Pode-se constatar nesta pesquisa em específico, quais são os parâmetros elétricos significativos para a rugosidade superficial média, sendo o seu conhecimento e controle, fundamentais para a otimização do processo. As técnicas estatísticas apresentaram-se como ferramentas muito úteis para o domínio da tecnologia industrial, principalmente em casos onde há necessidade do ajuste de muitos fatores, gerando previsibilidade, economia, agilidade e confiabilidade ao processo.

Palavras-chave: EDM; Rugosidade; Parâmetros Elétricos; Estatística; Otimização.

ABSTRACT

This experimental research aims to analyze the influence of electrical parameters of electrical discharge machining (EDM) on the average roughness (R_a) of AISI P20 steel, which is widely used in the mold industry for thermoplastic injection. It is also proposed in this study the optimization of these parameters to obtain the desired surface roughness of the material. The planning and statistical results were obtained through the experiment design methodology (DOE). *Statistica* software was used to create graphs and tables based on the response surface methodology (RSM). The analysis of the results showed that the duration of the discharge pulse (T_{on}) and the intensity of the electric current are the parameters with the greatest effect on surface roughness. Based on other studies on EDM, the statistical analysis presented results in conformity with regard to the influence of factors. The optimization graph consistently indicated the adequate levels of adjustment of the parameters to obtain the desired response. It can be verified in this research in specific, what are the significant electrical parameters for the average surface roughness, being its knowledge and control, fundamental for the optimization of the process. Statistical techniques were presented as very useful tools for mastering industrial technology, especially in cases where there is a need to adjust many factors, generating predictability, economy, agility and reliability to the process.

Keywords: EDM; Roughness; Electrical Parameters; Statistics; Optimization.

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias médica, aeronáutica e aeroespacial, de eletrônicos, na indústria de ferramentaria em geral, entre outros, a eletroerosão por penetração é um processo de usinagem largamente empregado, tendo sua principal aplicação na confecção de moldes de injeção de plásticos e compósitos [1, 2]. A eletroerosão na fabricação de moldes, apresenta bom desempenho, dando ênfase à vantagem da não interferência da dureza do material na usinagem e por proporcionar moldes com geometria complexa, paredes finas e livre de rebarbas [3]. O tradicional aço AISI P20 ainda é o material mais aplicado no mundo na confecção de molde para injeção de termoplásticos [4].

O processo de eletroerosão se tornou uma das tecnologias mais importante e difundida na indústria de manufatura para a obtenção de formas complexas, utilizando o corte a fio ou a penetração. Desenvolvido a várias décadas, tem sido aceito em todo o mundo como um processo padrão para a fabricação de ferramentais. De forma geral, é considerado como o quarto mais popular processo de usinagem de ferramentais; os processos mais utilizados são: fresamento, torneamento e retificação. É amplamente aplicado no processo final de fabricação do ferramental, ou seja, no acabamento, que exige a usinagem de precisão [5].

Simplificadamente, em um processo de usinagem por descarga elétrica, o material da peça de trabalho é gradualmente removido por energias térmicas gerada por uma série de pulsos de descarga elétrica ocorridos em uma fresta (GAP) entre o eletrodo e a peça de trabalho imersa em um fluido dielétrico. A aplicação de EDM é limitada à usinagem de materiais eletricamente condutores. O dielétrico possibilita concentrar a energia de uma descarga elétrica em uma pequena área, além de auxiliar na refrigeração da peça e na remoção dos detritos no GAP [6].

A usinagem por descarga elétrica (EDM) é um método de fabricação não convencional e tem a capacidade de usinar materiais com alto ponto de fusão, dureza, resistência e tenacidade [7]. Para materiais difíceis de serem usinados pelos métodos convencionais, o EDM demonstrou ser um processo eficiente, tornando relativamente simples usinar formas intrincadas que seriam impossíveis de produzir com ferramentas de corte convencionais. Este processo de usinagem está continuamente encontrando novas aplicações na indústria de usinagem de materiais [8], e está sendo amplamente utilizado para produzir cavidades de quase todos os formatos em moldes de metal para injeção de plásticos [1, 7]. O desenvolvimento de novas tecnologias para alcançar qualidade superficial é a principal tendência das pesquisas sobre EDM [9].

O aço AISI P20 é um tipo de metal próprio para moldes de injeção de plástico, e tem sido amplamente utilizado em moldes de grande e média precisão, devido à sua alta temperabilidade e boas propriedades mecânicas [10, 11]. O principal aspecto técnico do molde é a qualidade, onde deve-se produzir de acordo com as especificações técnicas de cada cliente. Nisso se insere a seleção do material para fabricar o molde, que incluem fatores como usinabilidade, polibilidade e resistência à corrosão [3]. O molde é um elemento crítico em termos de produtividade e qualidade dos produtos finais, especialmente na moldagem por injeção de plásticos [12]. Por isso, para a correta aplicação do processo EDM, é importante o domínio da tecnologia associada, através do conhecimento da relação entre a influência dos fatores envolvidos e dos resultados obtidos.

O uso de produtos plásticos tem aumentado em várias aplicações, como automóveis, construção naval, aviões e eletrodomésticos, devido à sua baixa densidade, facilidade de fabricação e baixo custo [13]. A popularidade do processo de injeção na produção de produtos plásticos, se deve a algumas vantagens, tais como, alta produtividade e fácil robotização e automação, extensa gama de resinas plásticas injetadas, produção de peças tridimensionais complexas com elevada qualidade, precisão dimensional e reprodutibilidade, e possibilidades de vários acabamentos superficiais e texturizações [4].

O tamanho do mercado global de plásticos moldados por injeção foi avaliado em US \$ 265,1 bilhões em 2020 e deve se expandir a uma taxa composta de crescimento anual de 4,6% de 2021 a 2028. A crescente demanda por componentes plásticos de várias indústrias de uso final, incluindo automotiva, embalagens, eletrodomésticos, aparelhos elétricos e eletrônicos e médicos deverão impulsionar o mercado, especialmente em mercados emergentes como o Brasil. Inovações modernas para minimizar a quantidade de produtos defeituosos, aumentaram a importância da tecnologia de moldagem por injeção, principalmente na produção em massa de artigos plásticos com formatos complexos [14].

Muito moldes somente podem ser fabricados pelo processo EDM por penetração, haja vista algumas limitações nas usinagens convencionais, como a não possibilidade de gerar cantos vivos em cavidades, ferramentas que não possibilitam atingir grandes profundidades, risco de quebra de ferramentas de pequeno diâmetro, formação de aresta postiça na ferramenta que pode provocar defeitos superficiais, principalmente na usinagem de metais dúcteis, possibilidade de riscos superficiais devido a geração de cavaco, elevada dureza do material, entre outros. Desta forma, é importante propiciar ao processo de usinagem EDM de materiais específicos, como o aço AISI P20, o adequado ajuste dos seus parâmetros. Segundo AMORIM [15], no cotidiano industrial as

condições ótimas de usinagem EDM são raramente alcançadas, e os fabricantes enfrentam sérios problemas para estabelecer a estratégia de escolha dos parâmetros adequados.

A falta de conhecimento sobre a interação dos parâmetros de usinagem para se obter o desempenho esperado, é uma das maiores dificuldades enfrentadas pelas indústrias de manufatura que utilizam o processo EDM; sendo a qualidade superficial obtida pela usinagem, dependente do ajuste adequado dos parâmetros de máquina previamente selecionados. Portanto, é significativo possibilitar o melhor ajuste dos parâmetros de usinagem conforme a qualidade superficial almejada ao molde. Desta forma, o presente artigo tem como objetivo, através de técnicas estatísticas, analisar e propor a otimização dos parâmetros elétricos de usinagem EDM sobre a rugosidade média (R_a) do aço AISI P20.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha do aço AISI P20 foi definida tanto através da revisão bibliográfica, onde vários autores, como REES [16] e DEWANGAN *et al.* [17] indicam este aço como matéria-prima abrangentemente utilizada na confecção de moldes de injeção, como também na pesquisa em empresas de manufatura, que da mesma forma apontaram o AISI P20 como material usual na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos.

O material do eletrodo-ferramenta utilizado para os pré-ensaios foi de cobre eletrolítico de seção quadrada de 20 mm × 20 mm, sendo que para os ensaios definitivos, foi usinado para diminuição da seção transversal e melhor aproveitamento da área do material disponível para os testes, ficando então com seção de 10 mm × 10 mm. O material escolhido para o eletrodo-ferramenta baseou-se na grande aplicação deste na fabricação de moldes. A imagem do eletrodo e de uma peça de trabalho utilizada, pode ser vista na Figura 1.

O fluido dielétrico utilizado foi a base de hidrocarbonetos, que é bastante usual nas indústrias e frequentemente citado na literatura especializada. Os testes de usinagem EDM foram realizados nos laboratórios da Universidade de Passo Fundo. Os experimentos foram realizados em uma máquina EDM modelo AgieCharmilles SP 1U, mostrado na Figura 2.

Para o planejamento e a análise estatística utilizou-se o software *Statistica*. Além da própria máquina EDM, foi utilizado rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-410, para verificação da rugosidade média (R_a). Também foi feito o levantamento da taxa de remoção de material (TRM), para análise da relação com a rugosidade superficial, obtida através da equação abaixo:

$$TRM = \frac{\text{volume de material removido (mm}^3\text{)}}{\text{tempo de erosão (min)}} \quad (1)$$

A rugosidade superficial média (R_a) é um parâmetro determinado em função da linha média do perfil de rugosidade, e é definida de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287:2002. As principais aplicações deste parâmetro são no controle contínuo da rugosidade na linha de produção. Apresenta como vantagem ser um parâmetro de rugosidade aplicável à maioria dos processos de fabricação, e praticamente todos os equipamentos de medição contemplam esse parâmetro, além do fato de que eventuais e isolados desvios do perfil de rugosidade alteram pouco seu valor [18].

A polaridade do eletrodo foi fixada como positiva, devido ser a configuração mais tradicional. Alguns autores compararam com a configuração negativa, obtendo resultados inferiores no quesito desgaste do eletrodo, porém com redução no rendimento do processo, assim como fez AMORIM e WEINGAERTNER [19], na usinagem do aço AISI P20. O GAP, que é a distância suficiente entre a ferramenta e a peça para romper as propriedades resistivas do dielétrico e assim permitir a descarga elétrica [6], não foi estipulado no processo, pois a

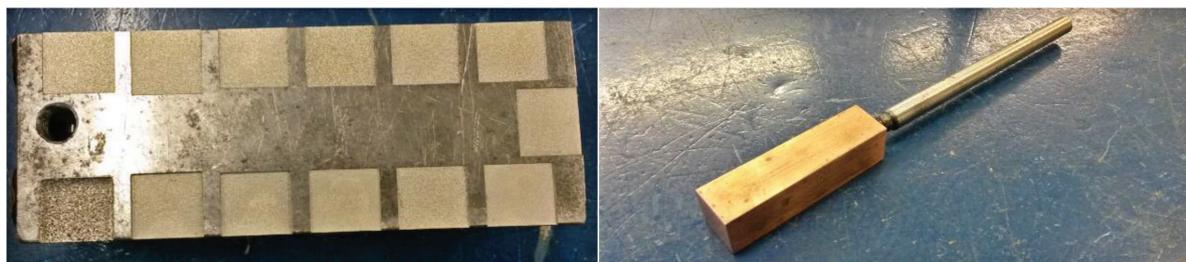


Figura 1: Peça de aço AISI P20 e eletrodo de cobre eletrolítico.

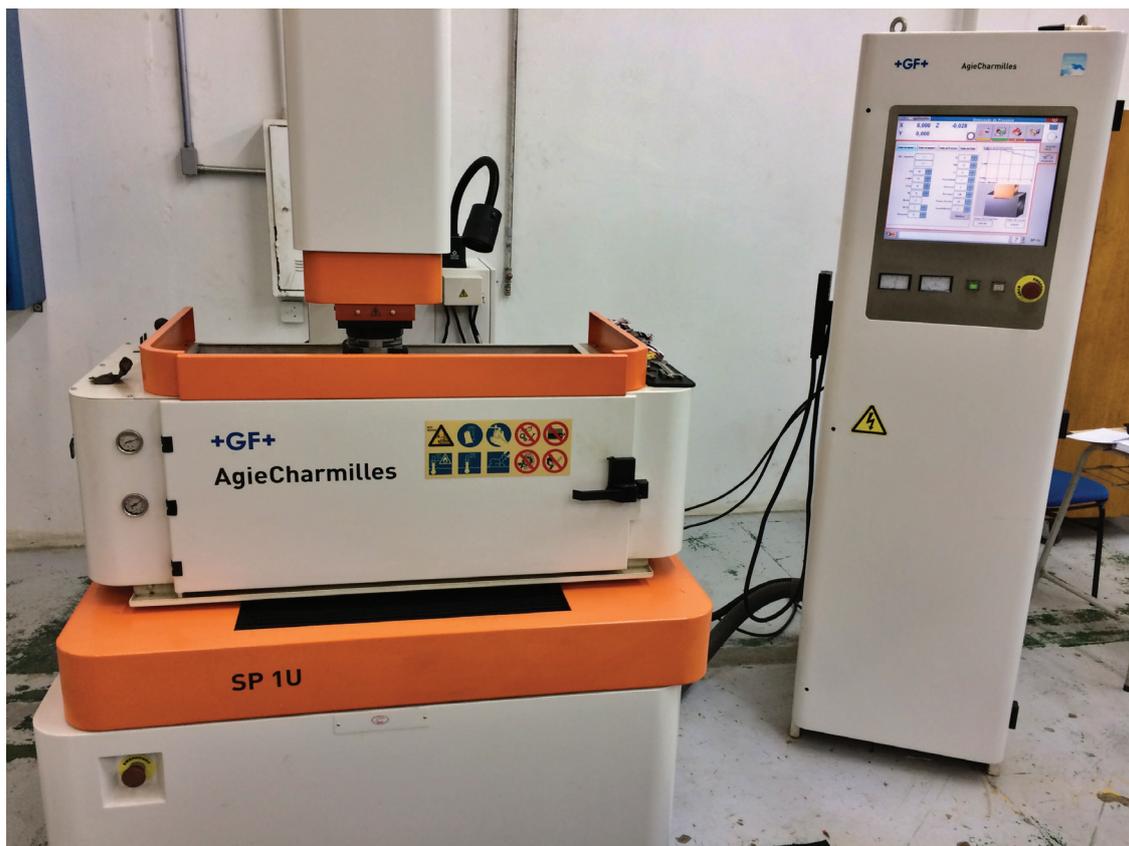


Figura 2: Máquina EDM modelo AgieCharmilles SP 1U.

máquina de eletroerosão utilizada calcula o valor do GAP automaticamente para cada configuração de parâmetros inserida em sua programação.

A escolha dos fatores de usinagem a serem analisados foram baseados principalmente na literatura, onde revisou-se quais deles exerciam papel significativo para a rugosidade superficial. A corrente elétrica, tensão elétrica, tempo de pulso ligado (T_{on}) e desligado (T_{off}), foram os fatores mais significativos e indicados para análise. Já a escolha dos níveis dos fatores aplicáveis aos ensaios definitivos foi baseada primordialmente pelos pré-ensaios.

Para reduzir os custos experimentais utilizou-se a estratégias do delineamento de experimentos (DOE – *Design of Experiments*), que é uma técnica estatística competente para modelar e otimizar experimentos [20]. De acordo com NAVES *et al.* [21], a metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) é um tipo de DOE vastamente utilizado. Entre vários projetos de RSM, há um arranjo específico, conhecido como Delineamento Composto Central (CCD – *Central Composite Design*), o qual utilizou-se nos ensaios definitivos, para determinação do número de experimentos e combinações, de forma a extrair o máximo de informações com o menor número de experimentos. Os experimentos foram compostos de pontos centrais, estimando assim o erro puro, e com pontos axiais, que serão os responsáveis por determinar os termos quadráticos. A Figura 3 apresenta as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Foram realizados 31 ensaios seguindo a matriz de experimentos composto central, com profundidade de erosão definida em 0,5 mm. Posteriormente a usinagem, foram obtidos a TRM, através dos tempos de erosão de cada ensaio, e os valores de rugosidade através do rugosímetro. Para a análise dos resultados dos ensaios definitivos, foram utilizadas as técnicas da metodologia de superfície de resposta, com a geração de gráficos e tabelas, e também a obtenção do gráfico de otimização, através da função desejabilidade.

3. RESULTADOS

Após a realização dos pré-ensaios, usando diferentes níveis de parâmetros, constatou-se que o fator mais significativo para a variação da taxa de remoção de material foi a corrente elétrica, sendo que maiores corrente

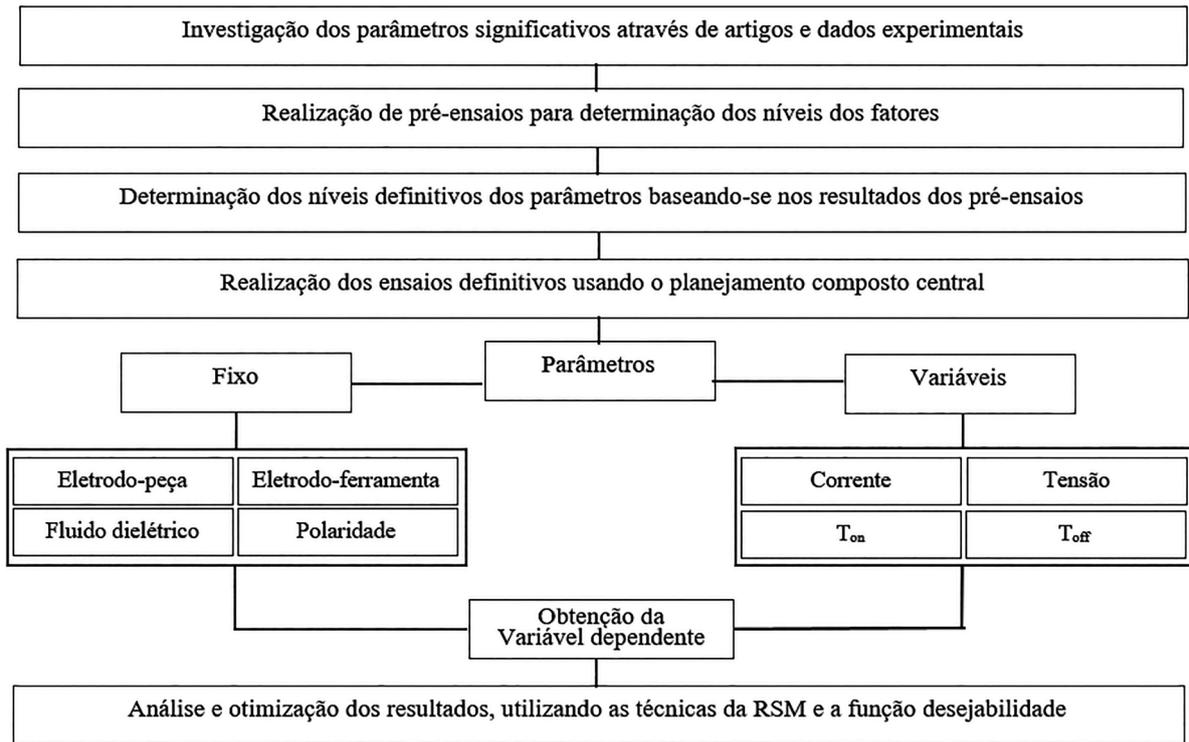


Figura 3: Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.

resultaram em menores tempos de usinagem, em coerência com os obtidos na literatura. O valor de corrente elétrica usada nos pré-ensaios foi de 9 A, valor aproximado aos que são utilizados em geral pelos operadores das máquinas EDM para obtenção de superfícies semiacabadas. Para os ensaios definitivos, preferiu-se aumentar os níveis de corrente elétrica, visto a demora no tempo de usinagem dos pré-ensaios, que demonstrou que a corrente elétrica é muito significativa no rendimento do processo.

Adotou-se o valor médio de tensão de 75 V, pois o valor máximo de tensão disponível na máquina EDM utilizada é de 100 V, sendo que este valor se manteve tanto para os pré-ensaios quanto para os ensaios definitivos. O parâmetro de duração do pulso de descarga (T_{on}) e duração do intervalo entre duas descargas (T_{off}) foram definidos respectivamente em 16 μs e 12 μs ; baseando-se exclusivamente nos parâmetros pré-ajustados no controle da máquina EDM. Desta forma, os níveis dos fatores que serão investigados, estão apresentados a seguir na Tabela 1.

O planejamento experimental da matriz composto-central pode então ser elaborado, com 7 pontos centrais, conforme mostra a Tabela 2, já com os valores das variáveis dependentes inseridos. É possível notar que o valor mínimo de rugosidade média se encontra no ensaio 17, obtido com o valor de 2,735 μm . O maior valor se encontra no ensaio 22, atingindo a rugosidade de 11,637 μm .

Tabela 1: Fatores e níveis investigados nos ensaios definitivos.

FATORES	NÍVEL		
	-1	0	1
Corrente (A)	9	13	17
Tensão (V)	65	75	85
T_{on} (μs)	14	16	18
T_{off} (μs)	9	12	15

Tabela 2: Resultados das variáveis dependentes.

ENSAIOS	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	T _{on} (μS)	T _{off} (μs)	RUGOSIDADE (μm)	TRM (mm ³ /min)
1	9	65	14	9	9,605	11,23
2	9	65	14	15	4,966	6,64
3	9	65	18	9	6,162	10,92
4	9	65	18	15	6,815	7,43
5	9	85	14	9	5,359	8,33
6	9	85	14	15	5,945	6,64
7	9	85	18	9	6,181	5,86
8	9	85	18	15	6,146	3,58
9	17	65	14	9	6,951	48,19
10	17	65	14	15	6,317	44,44
11	17	65	18	9	10,743	61,53
12	17	65	18	15	10,566	50
13	17	85	14	9	7,326	48,19
14	17	85	14	15	6,078	30,3
15	17	85	18	9	10,762	31,74
16	17	85	18	15	9,565	33,89
17	5	75	16	12	2,735	0,27
18	21	75	16	12	7,303	66,66
19	13	55	16	12	10,271	61,53
20	13	95	16	12	9,269	47,16
21	13	75	12	12	5,071	38,09
22	13	75	20	12	11,637	34,48
23	13	75	16	6	9,213	42,1
24	13	75	16	18	8,321	26,66
25 (C)	13	75	16	12	9,478	37,73
26 (C)	13	75	16	12	7,735	37,03
27 (C)	13	75	16	12	8,757	51,54
28 (C)	13	75	16	12	7,927	35,39
29 (C)	13	75	16	12	8,253	39,6
30 (C)	13	75	16	12	9,136	42,1
31 (C)	13	75	16	12	8,893	39,6

Tabela 3: ANOVA para a rugosidade.

FATOR	SS SOMA DOS QUADRADOS	DF (GRAUS DE LIBERDADE)	MS (MÉDIA DOS QUADRADOS)	F (DISTRIBUIÇÃO DE FISCHER)	p (NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA)
(1)Corrente (L)	28,7438	1	28,74376	69,25712	0,000163
Corrente (Q)	27,4313	1	27,43125	66,09468	0,000186
(2)Tensão (L)	1,908	1	1,90801	4,59729	0,075717
Tensão (Q)	1,241	1	1,24101	2,99017	0,134501
(3) T_{on} (L)	31,5677	1	31,56773	76,06139	0,000126
T_{on} (Q)	0,6069	1	0,60685	1,46219	0,272063
(4) T_{off} (L)	2,9927	1	2,99273	7,21089	0,036279
T_{off} (Q)	0,0515	1	0,05147	0,12402	0,736749
1L por 2L	0,5894	1	0,58944	1,42024	0,27836
1L por 3L	15,0835	1	15,08351	36,34322	0,000941
1L por 4L	0,002	1	0,002	0,00483	0,946878
2L por 3L	0,1404	1	0,14044	0,33838	0,581946
2L por 4L	0,5267	1	0,52671	1,2691	0,302966
3L por 4L	1,6764	1	1,67638	4,03918	0,091184
Falta de ajuste	13,2891	10	1,32891	3,20197	0,083723
Erro puro	2,4902	6	0,41503		
Total SS	129,458	30			

3.1. Resultados estatísticos da influência dos fatores sobre a rugosidade

Um dos parâmetros estatísticos mais importantes na determinação da confiabilidade da resposta de um modelo, é o R^2 ou coeficiente de determinação. O coeficiente de determinação múltipla é comumente usado no julgamento do quanto um modelo de regressão é adequado, sendo que seu valor pode variar entre 0 e 1. O resultado de R^2 mensura a variabilidade dos dados considerados pelo modelo de regressão, e através disso, possibilita-se a análise qualitativa do modelo de regressão [22]. Quanto maior o valor de R^2 mais confiável é o modelo.

Obteve-se para a análise de variância da rugosidade, apresentada na Tabela 3, o R^2 de 0,87811 (87,811%), usando o modelo quadrático completo, que faz interações de segunda ordem entre todas as variáveis disponíveis. O erro puro foi escolhido para analisar o erro experimental e pode-se perceber que não houve falta de ajuste significativa no modelo, para o nível de significância requerido.

O diagrama de Pareto da Figura 4, mostra os fatores significativos sobre a rugosidade, considerando que se utilizou para os experimentos um nível de significância requerido de 0,05. Os fatores que transpassam a linha vertical tracejada vermelha, são significativos na variável resposta. Onde pode-se observar como fatores significativos na variável resposta rugosidade, os termos lineares, corrente, T_{on} , T_{off} , o termo quadrático da corrente e a interação entre a corrente e T_{on} . Segundo [23], quando o termo quadrático apresenta um coeficiente estatisticamente significativo, pode-se concluir que a superfície de resposta possui curvatura.

Os efeitos e os coeficientes do modelo de regressão, em termo das variáveis escalonadas, são apresentados na Tabela 4, onde pode-se notar que os fatores com maiores efeitos para a rugosidade são a corrente e o tempo de descarga (T_{on}), sendo o termo linear do tempo de descarga o fator que apresentou maior efeito no aumento da rugosidade.

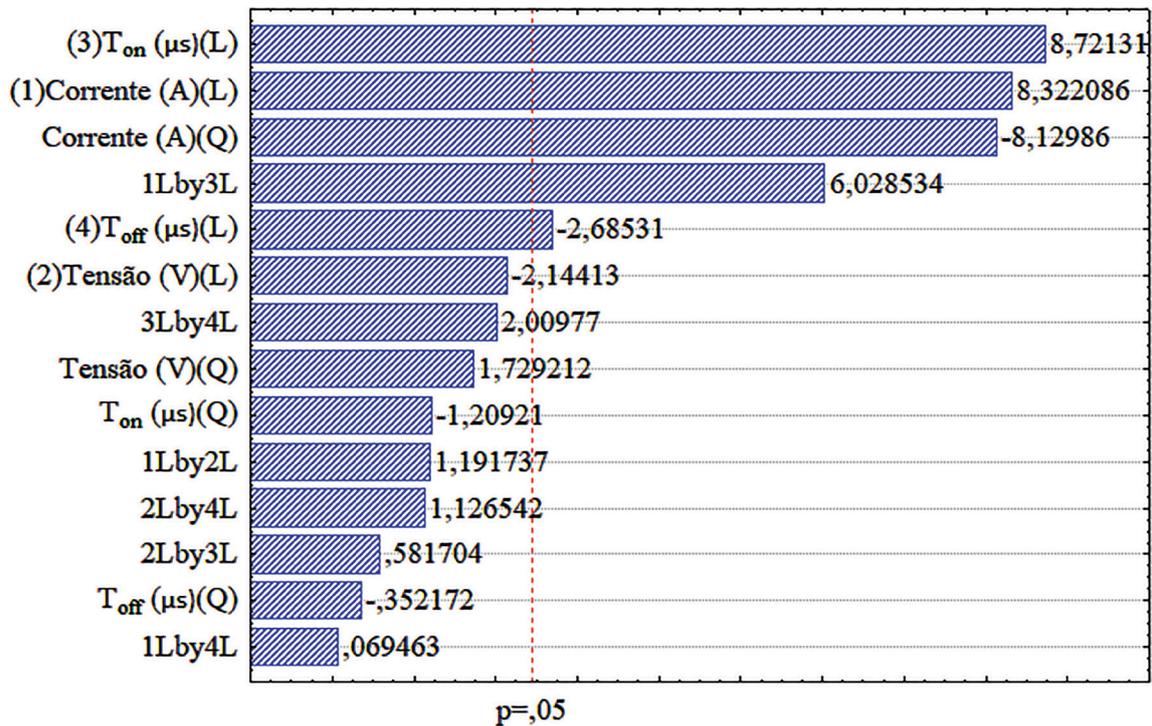


Figura 4: Diagrama de Pareto para a rugosidade em função dos valores da estatística de teste t.

Tabela 4: Efeito das variáveis sobre a rugosidade.

FATOR	EFEITO	<i>p</i>	COEFICIENTE
Média/Interc.	8,59700	0,000000	8,597000
(1)Corrente (L)	2,18875	0,000163	1,094375
Corrente (Q)	-1,95885	0,000186	-0,979427
(2)Tensão (L)	-0,56392	0,075717	-0,281958
Tensão (Q)	0,41665	0,134501	0,208323
(3)T _{on} (L)	2,29375	0,000126	1,146875
T _{on} (Q)	-0,29135	0,272063	-0,145677
(4)T _{off} (L)	-0,70625	0,036279	-0,353125
T _{off} (Q)	-0,08485	0,736749	-0,042427
1L por 2L	0,38388	0,278360	0,191938
1L por 3L	1,94188	0,000941	0,970938
1L por 4L	0,02237	0,946878	0,011187
2L por 3L	0,18738	0,581946	0,093688
2L por 4L	0,36288	0,302966	0,181438
3L por 4L	0,64738	0,091184	0,323688

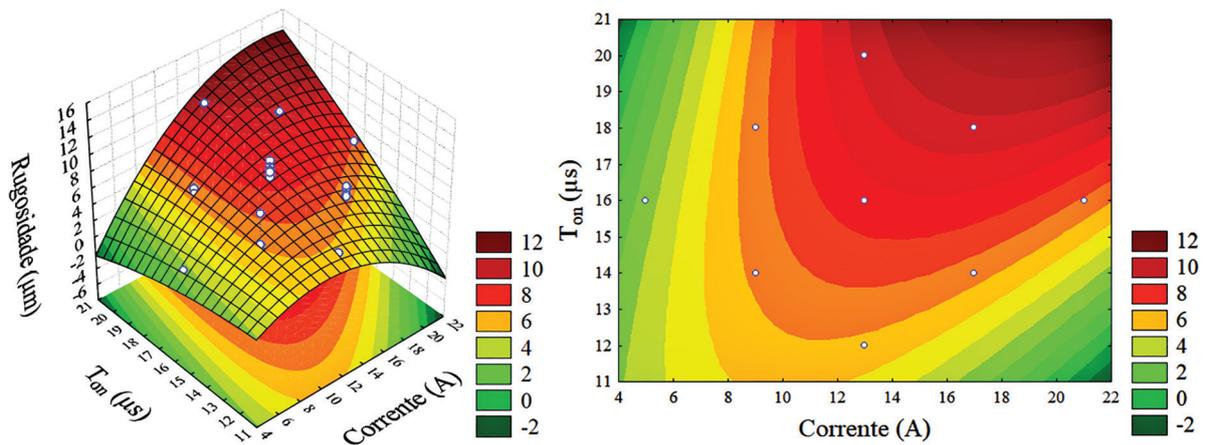


Figura 5: Gráfico tridimensional e de contorno obtidos pelo RSM.

Tabela 5: Resultados de rugosidade obtidos com variação do tempo de descarga (T_{on}).

CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	T_{on} (μ s)	T_{off} (μ s)	RUGOSIDADE (μ m)
21	75	14	12	8,44
21	75	12	12	7,98
21	75	10	12	6,01
21	75	8	12	5,01

A relação entre os parâmetros de entrada e os parâmetros de saída pode ser obtida usando a ferramenta estatística de análise de regressão [24]. Os coeficientes do modelo de regressão, em termos das variáveis escalonadas, também mostrados na Tabela 4, são dados por:

$$\text{Rugosidade: } 8,597 + 1,094 I - 0,979 I^2 + 1,147 T_{on} - 0,353 T_{off} + 0,971 I * T_{on}$$

Na Figura 5 estão plotados o gráfico tridimensional e o gráfico de contorno das variáveis que apresentaram interação e os níveis mais significativo sobre a rugosidade média.

Foram feitos alguns ensaios individuais para verificação que mesmo com altas correntes é possível diminuir a rugosidade superficial com a diminuição do tempo de pulso, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

3.2. Desejabilidade

Para obter variáveis de resposta, geralmente está-se interessado em encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis independentes, que satisfaçam os requisitos necessários para a obtenção da variável dependente desejável. A primeira ação é determinar o modelo adequado para descrever as variáveis de resposta, para então encontrar uma série de condições operacionais que otimize todas as respostas ou, no mínimo, as mantenha em uma faixa desejável. A busca dessa faixa desejável pode ser feita graficamente, através da suposição das curvas de nível para todas as respostas. Pelo fato dessas curvas serem bidimensional, esse método se torna confuso para mais de dois fatores. Uma técnica mais adequada, é usar o procedimento da otimização com restrição. O software *Statistica* usa a abordagem que propõe o uso da função *Desirability* [25].

Durante a pesquisa dos parâmetros usuais de usinagem EDM e coletando dados industriais sobre a rugosidade para moldes de injeção, ficou definido como valores de rugosidades aceitáveis, rugosidades (R_a) menores que 3,5 μ m. Desta forma, gerou-se o gráfico de desejabilidade, apresentado na Figura 6, a partir da solicitação de otimização, requerendo-se a maior taxa de remoção de material, para uma rugosidade de 3,5 μ m.

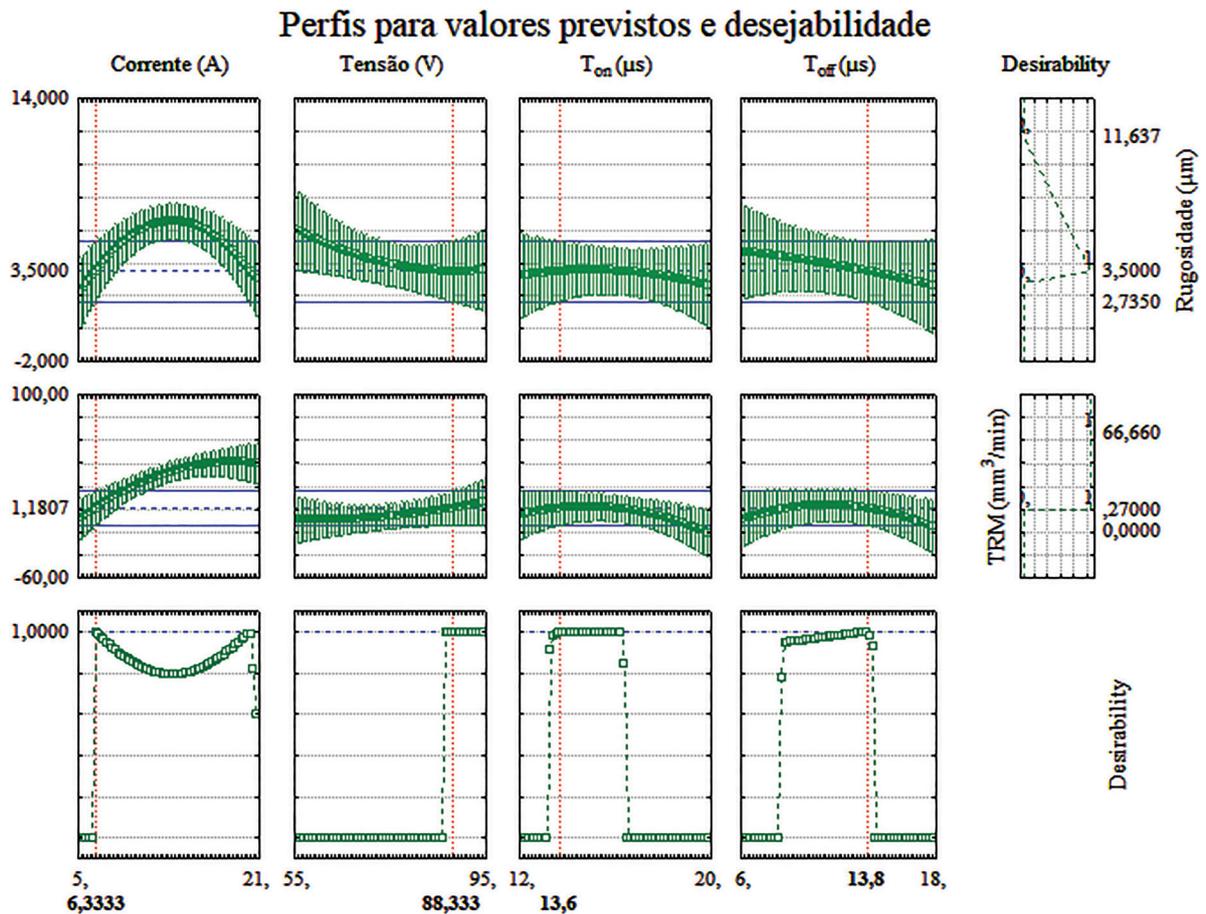


Figura 6: Gráfico da função desejabilidade.

O gráfico de desejabilidade ou otimização, apresenta curvas de variância que representam a influência de cada fator sobre a variável de resposta. Essas curvas representam como cada parâmetro se comporta dentro da análise. A linha vermelha vertical que passa por cada coluna dos quatro fatores é o indicador do nível adequado para se obter as variáveis respostas estipuladas, ao passo que uma mudança nos níveis dos fatores gera automaticamente uma mudança na variável resposta. No gráfico da Figura 6, para o valor de rugosidade estipulada, o valor máximo aproximado da TRM será de 1,1807 mm^3/min , utilizando os níveis dos fatores indicados no gráfico, sendo a corrente 6,333 A, tensão 88,33 V, T_{on} 13,6 μs e T_{off} 13,8 μs .

O composto *Desirability* (D), é o índice global, e está apresentado pela linha azul tracejada que cruza as colunas do gráfico, na Figura 6. A partir da combinação de cada uma das variáveis dependente transformadas através de uma média geométrica, é calculado e obtido este índice *Desirability*. O qual demonstra as melhores condições das variáveis independentes para obter a otimização das variáveis de resposta simultaneamente. O valor de *Desirability*, faz parte do intervalo de 0 até 1, sendo maximizado quando todas as respostas se aproximam de suas especificações, pois quanto mais próximo de 1 estiver o valor D, mais próximas as respostas originais estarão dos seus respectivos limites de especificação [26].

4. DISCUSSÃO

Na Tabela 2, é possível perceber que o único valor de rugosidade abaixo de 3,5 μm , foi alcançado no ensaio 17; com corrente baixa de 5 A e os outros parâmetros em nível médio, que foi dado por um ponto axial abaixo do limite inferior, definido pelo software. Esta configuração resultou em uma taxa de remoção típica de acabamento (0,27 mm^3/min), acompanhado da menor rugosidade alcançada (2,735 μm).

A intensidade da corrente elétrica é muito significativa no processo EDM, sendo um fator determinante na energia do processo de erosão. Quanto maior a corrente aplicada ao processo, maior quantidade de energia está sendo liberada em cada centelha, fazendo com que a bolha de gás produzida tenha maior tamanho, intensidade e energia térmica acumulada. Ao interromper o fornecimento de energia durante o tempo desenergizado

(T_{off}), a bolha formada irá explodir, acarretando em crateras mais profundas e largas, e aumentando assim a rugosidade superficial [16, 27, 28, 29].

Valores menores de rugosidade obtidos com os níveis baixos de corrente são amplamente aceitos pela literatura. Segundo DEWANGAN *et al.* [16] a rugosidade superficial aumenta elevando-se a corrente de pulso, gerando também a formação de trincas mais profundas devido à alta energia da centelha associada à alta corrente de pulso. Observação semelhante também foi constatada com o aumento da duração de pulso (T_{on}). OLINIKI [27] comenta que no regime de acabamento por EDM, a TRM é menor, pois neste regime, a energia de descarga, dada pelo produto da tensão (V) e a corrente (A), é mínimo. Desta forma, situações de acabamento em eletroerosão podem ser alcançadas através da escolha correta dos parâmetros, mas será acompanhada por uma redução acentuada do rendimento. SANTOS [28] estudando o processo de eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6, afirmou que a corrente de descarga consumida no processo de eletroerosão é um parâmetro de extrema importância no rendimento e na qualidade da peça confeccionada.

A tensão de descarga irá determinar a distância entre o eletrodo e a peça, sendo que maiores tensões aumentam o GAP, e assim colaboram com o processo de lavagem e estabilidade do corte. A tensão de descarga influencia na energia da centelha, e, portanto, na taxa de desgaste do eletrodo, na taxa de remoção de material e na rugosidade superficial, pois seu aumento proporciona maior aporte energético imposto sobre a peça [29]. O aumento da tensão média de trabalho ocasiona maior abertura do GAP entre os eletrodos [30], desta forma é proporcionado boas condições de movimentação do dielétrico para retirada das partículas erodidas, evitando assim a ocorrência de material refundido sobre a superfície do material, diminuindo a rugosidade superficial. A tensão de descarga foi um parâmetro no qual para os níveis selecionados não se apresentou como significativo para a rugosidade, talvez utilizando-se de intervalos de valores de tensão maiores, este fator poderia apresentar-se como significativo, porém a máquina utilizada nos ensaios não permitia o ajuste de altos valores de tensão.

O intervalo entre duas descargas (T_{off}) demonstrou ser significativo neste experimento, conforme mostra o gráfico de Pareto. Na Tabela 4 de efeitos, pode-se perceber o valor negativo do T_{off} em relação a rugosidade, isto indica que ocorrerá um efeito de diminuição da rugosidade com o aumento do nível deste fator, resultado coerente com os relatados na literatura. O tempo desenergizado (T_{off}) apesar de apresentar-se significativo, é bem menos significativo na rugosidade quando comparado com o T_{on} e a intensidade da corrente.

Se não houver a correta aplicação de lavagem do GAP pelo dielétrico, com um tempo adequado de intervalo entre as descargas, pode-se afetar a rugosidade e a camada branca da superfície usinada. Uma lavagem ineficaz, promoverá baixa TRM e baixa qualidade do acabamento superficial. Outro fator importante para o ajuste adequado do T_{off} é para que ocorra a deionização do fluido dielétrico. Esse refere-se ao tempo para que íons e elétrons possam se recombinarem depois de uma descarga, isso é necessário para obter boas TRMs e evitar curtos-circuitos. Este tempo permite que o material fundido se solidifique e seja levado para fora do GAP. O T_{off} muito curto, gera faíscas instáveis e, então, curtos-circuitos ocorrerão [6, 17, 31, 32].

Outro fator de influência para rugosidade foi o tempo de descarga (T_{on}), a qualidade da superfície usinada diminui quando o eletrodo-peça é submetido a um tempo de descarga elétrica alto, desta forma, aumenta-se a taxa de evaporação do dielétrico, gerando maiores bolhas promovidas pelas faíscas, causando assim, a deficiência na limpeza e na remoção rápida do calor das partículas implodidas após a descarga elétrica. T_{on} muito elevado, gera um período de maior resistência à passagem do fluido dielétrico, prejudicando assim a limpeza da área usinada, o que pode gerar mais material refundido e aumentar a rugosidade. Quanto maior a duração da descarga elétrica (T_{on}) aplicado ao processo, mais tempo a ponte de energia estará em contato com o material a ser erodido, colaborando para o aumento do tamanho e temperatura das bolhas de gases, que ao se romperem irão gerar deformações mais acentuadas e atingir maior quantidade de material sub-superficial [15, 17, 27, 33].

SELVARAJAN *et al.* [34], em seu trabalho experimental analisou e comparou a usinabilidade EDM por penetração do aço inoxidável SS316 no desempenho da TRM e da rugosidade (R_a), utilizando eletrodos de cobre e grafite, ambos na polaridade positiva. A duração do pulso (8, 10 e 12 μ s), o intervalo de pulso (4, 6 e 8 μ s), e a corrente de pico (10, 12 e 14 A) foram os parâmetros variáveis. A análise de variância mostrou que o fator de maior influência para o acréscimo nos valores de rugosidade superficial foi o aumento no tempo de duração do pulso de descarga (T_{on}). Na usinagem com eletrodo de cobre, o tempo de pulso (72%) apresentou a maior influência para a rugosidade, seguido pela corrente elétrica (11%).

A única interação entre os fatores que se apresentou como significativa para a rugosidade neste estudo, foi entre a corrente e T_{on} . Esta interação pode ser entendida como a influência da mudança de comportamento de um fator (corrente elétrica) nos diferentes níveis do outro fator (T_{on}), que ocasiona modificações com respeito a característica de interesse, que neste caso é a rugosidade. Nos gráficos de contorno e tridimensional obtidos pelo RSM, exibidos na Figura 5, é observado que altas correntes com alto T_{on} geram maiores rugosidades. Em configurações de alta corrente, há maior intensidade de energia sendo atribuída ao processo, gerando crateras

mais profundas e isso ocasiona um aumento de rugosidade. Porém, menor tempo de descarga faz com o tempo de contato entre a ponte de energia (canal de plasma) e o material seja pequeno, não atingindo temperaturas muito elevadas, o que atenua os efeitos da alta corrente, gerando crateras menores e diminuindo a rugosidade.

Com o T_{on} mais estendido, maior é tempo de exposição do material com as centelhas, e o processo tenderia a ter rugosidades mais elevadas; porém se a intensidade da corrente for em níveis baixos, esse tempo de exposição não é tão prejudicial para o acabamento, pois mesmo sendo exposto por um longo tempo de descarga, a baixa corrente não gera energia suficiente para grandes deformações superficiais no material [15, 17]. Resultados convincentes foram obtidos na Tabela 5, em que mantendo a intensidade da corrente e aumentando o tempo de descarga, aumenta-se a rugosidade da peça. Sendo que o menor tempo de centelhamento acarreta em menor rugosidade, por limitar o tempo disponível de erosão, fazendo com que grande energia gerada pela corrente não fique acumulada, diminuindo assim a proporção de material refundido e o tamanho das crateras.

LEE e LI [8] em seu estudo, analisaram a integridade superficial de uma peça de carboneto de tungstênio após a usinagem EDM por penetração, utilizando-se de eletrodo Cu-W. Onde foi observado que na corrente de pico baixa e duração de pulso curta, as crateras eram rasas e a densidade de material ressolidificado era menor. Enquanto na corrente de pico alta e duração do pulso estendida, as crateras eram mais profundas e os materiais ressolidificados eram mais evidentes. Verificou-se a partir destes testes, que a rugosidade da superfície é função de dois parâmetros principais, a corrente de pico e a duração do pulso. A corrente de pico alta e/ou a longa duração do pulso, produzem uma superfície mais rugosa. O inverso também é verdadeiro, a corrente de pico mais baixa e/ou a duração do pulso mais curta, produzem uma superfície mais fina.

DEWANGAN *et al.* [17] usinando o aço AISI P20 com diferentes níveis de parâmetros, usando eletrodo de cobre de diâmetro 12 cm na polaridade negativa, chegou à rugosidade (R_a) mínima de 1,66 μm e 7,13 μm de máxima. Constatando através de seus resultados que os fatores de maior influência na rugosidade foram a corrente e a duração do pulso de descarga. Sendo que o aumento no valor destes fatores provoca a formação de trincas e crateras mais profundas, em decorrência da alta energia da centelha associada à alta corrente de pulso. E também relacionou o aumento da corrente com o aumento da camada branca, pois quanto maior a corrente de pulso, maior é a descarga de energia feita através da ponte produzida pelas faíscas, e consequentemente maior é a espessura de material refundido na superfície usinada.

WURZEL [33] se propôs a analisar o desempenho da liga de cobre-nióbio com diferentes composições de nióbio, para serem utilizadas como eletrodo-ferramenta na usinagem EDM do aço AISI H13, comparando com o desempenho do cobre eletrolítico. As ligas foram confeccionadas por metalurgia do pó, com teores de nióbio de 10, 20, 30, 40 e 50 % em peso. Foram analisados a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial (R_a). O tempo de descarga e a intensidade de corrente elétrica foram os parâmetros variáveis. Observou-se que em todas as configurações da liga cobre-nióbio, gerou-se uma superfície usinada de baixa rugosidade média, em comparação ao eletrodo de cobre. Isto deve-se provavelmente ao nióbio, que reduz o faiscamento, agindo como redutor de corrente, melhorando a qualidade superficial, mas diminuindo a TRM.

LEE *et al.* [35] investigaram no aço AISI 1045, o processo de EDM de uma pequena área usando eletrodo de cobre-tungstênio. Em relação a rugosidade, verificou-se algo interessante, em que o aumento da duração de pulso de descarga (T_{on}) após certo limite, acarretou na diminuição da rugosidade, para as correntes mais altas. Desta forma, conforme a duração do pulso é estendida, ocorre a expansão do canal de plasma e isso resulta em crateras maiores e mais planas, diminuindo a rugosidade. Desta forma, pode-se notar que o aumento do T_{on} até certo valores, aumenta a rugosidade superficial, porém a partir de um certo limite ele pode suavizar a rugosidade.

AMORIM e WEINGAERTNER [19] reforçam esta teoria, ao realizarem experimentos aplicado ao aço AISI P20, onde constataram que para este material, ocorre a diminuição da rugosidade da superfície após aumentar a certos níveis a duração de descarga, independentemente do nível da corrente e polaridade do eletrodo. Este fenômeno pode estar relacionado à exagerada duração de descarga, que causa um aumento excessivo do diâmetro do canal de plasma, o que diminui a pressão do plasma sobre as cavidades fundidas. Suavizando desta forma a rugosidade superficial da peça de trabalho, embora o processo se torne instável em função das condições inadequadas de lavagem.

4.1. Análise da otimização

Na Figura 6 consta o gráfico da função desejabilidade (*Desirability*) da configuração requerida, a qual apresentou níveis de parâmetros variáveis coerentes para a resposta rugosidade e a TRM. Pode-se perceber que o valor obtido no composto global *Desirability* (D), para as variáveis de resposta desejáveis, demonstra que o processo foi bem otimizado, pois esse índice se encontra na condição ótima (1,0000). Esta função demonstrou-se muito útil para a otimização das variáveis independentes, principalmente em situações em que a variável dependente

sofre variações devido a muitos fatores, como no caso da rugosidade superficial gerada pelo processo EDM por penetração.

PIMENTA *et al.* [26] demonstraram a aplicação do método *Desirability*, voltados à otimização do processo de têmpera e revenimento, em arames de aços treilados SAE 9254. A análise gráfica produzida através da aplicação da função *Desirability*, gerou a visualização simultânea do comportamento das múltiplas respostas, e a otimização do processo, com a indicação da melhor condição de ajuste dos fatores de entrada. Promovendo mais eficiência das variáveis de saída em relação às especificações. Concluindo que a aplicação do método *Desirability*, poderá proporcionar a otimização das múltiplas respostas nas melhores condições e garantindo o atendimento das especificações.

Observa-se no gráfico de otimização da Figura 6, que tanto T_{on} quanto T_{off} apresentam valores sugeridos praticamente iguais, colaborando com a teoria de AMORIM e WEINGAERTNER [19]; que consideram, que ao configurar o tempo de pulso de energia igual ao intervalo de pulso, geralmente nota-se uma boa estabilidade nas operações de EDM. Tempos de intervalo de descarga maiores em relação ao tempo de descarga, levaria a frequências de descargas muito baixas, conseqüentemente diminuindo a TRM. Por outro lado, tempos de intervalos de descarga muito baixo em relação ao tempo de descarga, possivelmente ocasionaria uma concentração excessiva de detritos no GAP; isso causaria uma remoção não uniforme do material ao longo das superfícies frontais da ferramenta e da peça, bem como um possível aumento da rugosidade.

5. CONCLUSÕES

Com esta pesquisa, pode-se analisar a influência dos parâmetros elétricos na rugosidade superficial do aço AISI P20. Para os níveis selecionados, a intensidade da corrente elétrica de pico, e o tempo de pulso de descarga, apresentaram-se os mais significativos na influência da qualidade superficial. Sendo o seu conhecimento fundamental para o controle da rugosidade. A interação entre estes dois fatores apresentou-se significativa, pois o comportamento de uma variável é influenciado pela variação da outra.

A análise estatística mostrou que o aumento da corrente de pico e da duração do tempo de descarga, tendem a aumentar a rugosidade. Já no caso do tempo de intervalo de descarga acontece o contrário, com o aumento dos níveis deste fator, diminui-se a rugosidade. Teste demonstraram que mantendo-se a corrente e reduzindo o T_{on} , reduz-se a rugosidade, o inverso também tende a apresentar os mesmos resultados. Pesquisas apontam que após aumentar até certos valores de T_{on} , pode ocorrer uma diminuição na rugosidade superficial, porém isso gera instabilidade ao processo. Apesar da tensão de pulso elétrico não se apresentar significativa, ela tem uma função importante no processo, que é manter a abertura adequada do GAP, que propicia bons índices de TRMs e qualidade superficial.

As técnicas estatísticas utilizadas mostraram-se muitos úteis à análise da influência dos efeitos dos fatores na variável resposta, sendo que os resultados obtidos se apresentaram coerente com outros estudos sobre o tema. A função *Desirability*, demonstrou-se uma ferramenta de grande serventia para o ajuste dos parâmetros de usinagem EDM, em casos que os resultados variam conforme o ajuste simultâneo de vários fatores. Sendo que essa função estatística pode ser usada em muitos outros processos da indústria. Em casos específicos como o deste trabalho, a análise estatística apresenta-se como uma forte aliada no entendimento da influência dos fatores, e na possibilidade de proporcionar economia, agilidade e confiabilidade na usinagem, devido a previsibilidade de obtenção dos resultados almejados.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade de Passo Fundo pela cessão da sua estrutura e equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa, e ao seu corpo técnico pelo auxílio nas atividades práticas da pesquisa. Eu, Artur da Silva Rossetto, agradeço ao Instituto Federal do Rio Grande do Sul por me apoiar nesta pesquisa.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] PERUMAL, A., KAILASANATHAN, C., STALIN, B., *et al.*, “Evaluation of EDM process parameters on titanium alloy through Taguchi approach”, *Materials Today: Proceedings*, v. 45, pp. 2394–2400, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.737>
- [2] GUITRAU, E.B. *The EDM Handbook*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1997.
- [3] ALMEIDA, G., SOUZA, W. *Moldes e matrizes: características, desenvolvimento e funcionalidades para transformação de plásticos*. 1 ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [4] GONÇALVES, M., MARCHINA, P.M., DIHLMANN, C., “Aplicação de ligas de alumínio em moldes para injeção de termoplásticos”, *Ferramental*, n. 82, pp. 13–25, 2019.

- [5] PINEDO, C.E., “Danos superficiais causados em aços ferramentas pelo processo de eletroerosão”, *Ferramental*, n. 82, pp. 35–40, 2016.
- [6] JAIN, Vijay. K., *Advanced Machining Processes*. New Delhi: Allied Publisher Private Limited, 2002.
- [7] MING, W., SHEN, F., ZHANG Z., *et al.*, “A comparative investigation on magnetic field–assisted EDM of magnetic and non-magnetic materials”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 109, n. 3–4, pp. 1103–1116, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05653-8>
- [8] LEE, S.H., LI, X., “Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 139, n. 1–3, pp. 315–321, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00547-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00547-8)
- [9] JAMWAL, A., AGGARWAL, A., GAUTAM, N., *et al.*, “Electro-discharge machining: recent developments and trends”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 5 n. 2, pp. 433–448, 2018.
- [10] KARA, F., “Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel”, *Materials and Technologies*, v. 52, n. 2, pp. 195–200, 2018. <http://dx.doi.org/10.17222/mit.2017.088>
- [11] HOSEINY, H., CABALLERO, F.G., M’SAOUBI, R., *et al.*, “The influence of heat treatment on the microstructure and machinability of a prehardened mold steel”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 46, n. 5, pp. 2157–2171, 2015.
- [12] PARK, C., SIM, A., AHN, S., *et al.*, “Influence of laser surface engineering of AISI P20-improved mold steel on wear and corrosion behaviors”, *Surface and Coatings Technology*, v. 377, 124852, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.006>
- [13] SHIOU, F.J., CHENG, C.H., “Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 201, n. 1–3, pp. 554–559, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.235>
- [14] GRAND VIEW RESEARCH INC. Injection Molded Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Polypropylene, ABS, HDPE, Polystyrene), By Application (Packaging, Automotive & Transportation, Medical), By Region, And Segment Forecasts, 2021–2028, 2021. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/injection-molded-plastics-market>
- [15] AMORIM, F.L., *Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos*, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 175 p.
- [16] REES, H., *Mold Engineering*. 1ed. Ohio: Hanser Gardner Pubns, 1995. 621 p.
- [17] DEWANGAN, S., GANGOPADHYAY, S., BISWAS, C.K., “Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis”, *Measurement*, v. 63, pp. 364–376, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.025>
- [18] ALCOVER Jr., P.R.C. *Metrologia Mecânica*, 2021. <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/paulorjunior/2017-02/pg0022-em31b-metrologia-mecanica-eng.-mecanica-qui/Aula%2007%20-%20Metrologia%20Mecanica.pdf/view>
- [19] AMORIM, F.L., WEINGAERTNER, W.L., “The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 166, n. 3, pp. 411–416, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.026>
- [20] ALMEIDA, F.A., GOMES G.F., PAULA, V.R., *et al.* “A weighted mean square error approach to the robust optimization of the surface roughness in an AISI 12L14 free-machining steel-turning process”, *Journal of Mechanical Engineering*, v. 64, n. 3, pp. 147–156, 2018. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2017.4901>
- [21] NAVES, F.L., PAULA, T.I., BALESTRASSI, P.P., *et al.*, “Multivariate normal boundary intersection based on rotated factor scores: a multiobjective optimization method for methyl orange treatment”, *Journal of Cleaner Production*, v. 143, n. 1, pp. 413–439, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jclepro.2016.12.092>
- [22] MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- [23] MINITAB. *Interpretar os principais resultados para Analisar experimento de caracterização do processo definitiva*, 2021. <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/screening/analyze-screening-design/interpret-the-results/key-results/>
- [24] FAISAL, N., KUMAR, K., “Optimization of machine process parameters in EDM for EN 31 using evolutionary optimization techniques”, *Technologies*, v. 6, n. 2, pp. 1–16, 2018. <https://doi.org/10.3390/technologies6020054>

- [25] CALADO, V., MONTGOMERY, D.C., *Planejamento de Experimentos usando o Statistica*. 1 ed. Rio de Janeiro: E-Papers serviços editoriais, 2003. 260 p.
- [26] PIMENTA, C.D., SILVA, M.B., SALOMON, V.A.P., *et al.*, “Aplicação das metodologias desirability e simplex para otimização das propriedades mecânicas em arames de aço temperados”, *Production*, v. 25, n. 3, pp. 598–610, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.094812>
- [27] OLINIKI, R., *Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido*. Dissertação (Mestre em Engenharia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [28] SANTOS, R.F., *Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6*. Tese (Mestrado), PUC, Belo Horizonte, 2007.
- [29] JOSHI, A.Y., JOSHI, A.Y., “A systematic review on powder mixed electrical discharge machining” *Heliyon*, v. 5, n. 12, e02963, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02963>
- [30] CAMPOS, J.A.D., *Avaliação experimental do desgaste de campo durante o processo de eletroerosão do AISI H13*. Tese (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [31] ARANTES, L.J., SILVA, M.B., SILVA, E.M., *et al.*, “Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão”, *Rem: Rev. Esc. Minas*, v. 56, n. 2, pp. 91–96, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672003000200005>
- [32] KANSAL, H.K., SINGH S., KUMAR, P., “Application of Taguchi method for optimization of powder mixed electric discharge machining”, *International Journal of Management and Manufacturing Technology*, v. 7, n. 2–4, pp. 329–341, 2005. <https://dx.doi.org/10.1504/IJMTM.2005.006836>
- [33] WURZEL, C.A., *Estudo para a fabricação de eletrodos por metalurgia do pó e desenvolvimento de parâmetros de eletroerosão com ligas de cobre-nióbio*. Tese (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [34] SELVARAJAN, L., RAJAVEL R., VENKATARAMANAN K., *et al.*, “An experimental investigations and optimization of performance measures in EDM using copper and graphite electrodes”, *Materials Today: Proceedings*, v. 46, n. 19, pp. 9341–9347, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.816>
- [35] LEE, H.T., HSU, F.C., TAI, T.-Y., “Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper–tungsten electrode”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 364, n. 1–2, pp. 346–356, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.046>