

AVALIAÇÃO DA ÁREA USINADA POR MEIO DO ESTUDO DE SOBRECORTE EM SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS PELO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA EM LIGAS INCONEL 718

Rafael Loredo Felix Moreira de Melo

Daniel Fernandes da Cunha

Universidade Federal de Goiás

rafaelloredo@discente.ufg.br

danielcunha@ufg.br

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo do sobre corte no processo de texturização por usinagem eletroquímica em ligas INCONEL 718. O estudo é realizado em uma bancada desenvolvida na Universidade Federal de Goiás, utilizando como referência conceitos de métodos não convencionais de usinagem, aliados a estudos sobre texturização em metais. Objetiva-se obter a contribuição dos parâmetros de usinagem no sobre corte, além de uma configuração ótima que minimiza esse efeito. Utilizou-se o método estatístico Taguchi para chegar aos objetivos do trabalho, realizando ensaios que variam concentração de eletrólito, tempo de usinagem, corrente elétrica e frequência de pulso. Nos ensaios, o sobre corte não foi obtido, assim, partiu-se para o estudo do percentual de área não usinada para entender o impacto dos parâmetros sobre esse efeito. Concluiu-se que os parâmetros mais influentes na dimensão da área usinada são tempo de usinagem e corrente elétrica, com contribuição de 64,42% e 17,18%, respectivamente.

Palavras-chave: Texturização; Usinagem Eletroquímica; Sobre corte; Taguchi.

1. INTRODUÇÃO

No escopo dos processos não convencionais de usinagem, o processo de usinagem eletroquímica (ECM) é um dos mais difundidos (Das et al., 2014), já que permite a manufatura de metais condutores de alta dureza mecânica, assim como geometrias mais complexas. Na figura 1 é possível visualizar um esquema representativo de uma bancada que opera no processo ECM. Destaca-se que nesse método são utilizados altos valores de corrente elétrica e baixas tensões, além de ser utilizado um fluido eletrolítico bombeado constantemente na lacuna entre ferramenta (cátodo) e peça (ânodo) (Schubert, Schneider e Michaelis, 2014).

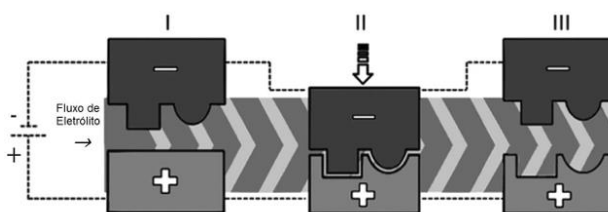


Figura 1. Esquema representativo do processo de usinagem eletroquímica mostrando interação entre o eletrodo (-) e peça de trabalho (+), mediante ao fluxo de fluido eletrolítico. (Schubert, Schneider e Michaelis, 2014)

Uma das aplicações possíveis da usinagem eletroquímica, é o processo de texturização de superfícies. De acordo com Suarez (2012), a texturização tem sua motivação na necessidade de otimizar as características de interação de uma peça com o meio, ou outro corpo. Dentre as aplicações desse processo, pode-se destacar desde melhora de acabamento superficial até a diminuição de atrito em processos diversos. Esse processo promove a grande vantagem de não produzir tensões residuais nem tensões térmicas na peça, já que o processo é de natureza química, não mecânica. Essa característica torna o processo uma alternativa poderosa para o acabamento de peças.

Parreira (2021) demonstra que existem alguns efeitos que contribuem na melhora do desempenho tribológico em peças texturizadas, dentre eles:

- O aprisionamento de partículas de desgaste dentro das bolsas da textura, evitando que fiquem entre as superfícies em contato.
- Aumento da capacidade de retenção de lubrificante dentro no contato.

- Possível aumento da pressão hidrodinâmica do lubrificante.

Assim como em qualquer processo convencional, o controle dos parâmetros de usinagem e compreensão de seus efeitos sobre o acabamento superficial da peça é de extrema importância na usinagem eletroquímica. Uma má otimização desses parâmetros pode acentuar o surgimento de efeitos indesejados no processo. Um efeito recorrente em peças texturizadas por ECM é o sobrecorte. Apesar de inerente ao processo, esse efeito é indesejado, e por conta disso existe o interesse em minimizá-lo sempre que possível.

Em geral, o sobrecorte pode estar associado a alguns parâmetros do processo. Dentre eles:

- Sistema de jateamento do fluido eletrolítico.
- Tensão de trabalho.
- Velocidade de avanço da ferramenta.
- Tipo de eletrólito.
- Sistema de filtragem do eletrólito

De acordo com McGeough (1988), o tipo de eletrólito influencia diretamente o efeito de sobrecorte. Por exemplo, uma solução de cloreto de sódio ($NaCl$) produz peças com menor precisão do que nitrato de sódio ($NaNO_3$), como é possível visualizar na ilustração da figura 2.

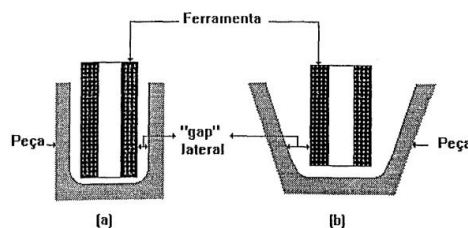


Figura 2. Processo de furação por ECM utilizando como eletrólitos $NaNO_3$ (a) e $NaCl$ (b). (McGeough, 1988)

O estudo do processo de usinagem eletroquímica já vem sendo estudado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de Goiás (LAMAF/UFG), de forma que foi desenvolvido por Franco e Cunha (2018) um maquinário para esse objetivo, e o mesmo equipamento foi otimizado por Oliveira (2019), e posteriormente por Melo, Pedroza e Cunha (2021)

Na busca de validar os parâmetros de usinagem do equipamento desenvolvido, objetiva-se com o presente trabalho identificar e estimar a influência dos parâmetros de usinagem sobre o efeito de sobrecorte no processo de texturização de ligas INCONEL 718. Objetiva-se também definir uma configuração ótima de parâmetros que minimize esse efeito, por meio da análise da estimativa de influência realizada.

Como ferramenta para análise dos dados relevantes ao objetivo, será utilizado o método estatístico da análise de variâncias (ANOVA). Para a definição dos experimentos, são utilizados arranjos ortogonais (matrizes experimentais), designadas por L_n , em que n representa o número de observações realizadas. As matrizes tem como finalidade estudar as variáveis significativas para um processo e suas respectivas interações, que em geral, ocorrem simultaneamente.

O método Taguchi faz o uso da razão sinal/ruído (S/R), de forma que para a condição **menor é melhor**, ela é dada por Eq. 1.

$$S/R = -\log\left(\frac{1}{n}\sum y_i^2\right) \quad (1)$$

em que n é o número de amostras em casa observação, e y os dados observados.

A análise de variâncias (ANOVA) é um método estatístico utilizado para interpretar dados experimentais e testar sua significância no processo (MONTGOMERY, 2017). Com ANOVA, é possível comparar três ou mais fatores e suas interações, podendo ser utilizado de forma complementar ao método Taguchi, por meio de testes de hipóteses.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se neste trabalho uma bancada de usinagem eletroquímica desenvolvida por Franco e Cunha (2018). Posteriormente, esse equipamento foi otimizado por Melo, Pedroza e Cunha (2021), como é possível visualizar na figura 3.



Figura 3. Bancada ECM utilizada para realizar os ensaios. (Próprio Autor)

Para a circulação do fluido eletrolítico, são utilizadas duas bombas de 30W, de forma que uma delas bombeia o fluido na lacuna peça-ferramenta, e a outra faz a sucção do fluido do reservatório. É utilizado um reservatório auxiliar para manter a circulação do eletrólito uniforme. Em relação à parte eletrônica da bancada de ensaios, é utilizado um módulo PWM, afim de tornar a corrente elétrica do ensaio pulsada. Deseja-se esse efeito para estudar a interferência no sobrecorte produzido ao final do processo.

Por fim, o avanço e lacuna são controlados por um manípulo e barra roscada, operados de forma manual, que movem o conjunto haste-ferramenta. Esse conjunto é guiado por quatro hastes rígidas, para manter o paralelismo peça-ferramenta. Todo esse conjunto é fabricado em materiais que não sofrem oxidação devido ao ambiente agressivo gerado pelo fluido eletrolítico, como é especificado em Melo, Pedroza e Cunha (2021). Na figura 4, é possível observar um modelo do mecanismo citado.

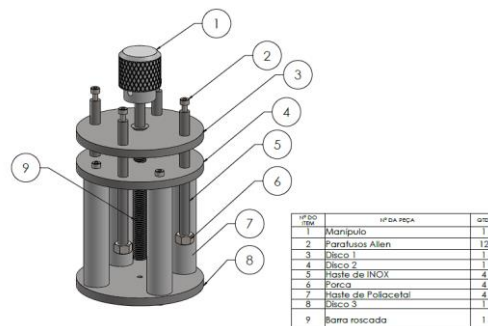


Figura 4. Projeto do conjunto haste, responsável pelo avanço da ferramenta. (Próprio autor)

2.1. Preparação dos corpos de prova e ensaios

Para o presente trabalho, são utilizadas amostras de INCONEL 718, uma liga de Níquel (Ni) com composição química listada na tabela 1.

Tabela 1. Composição da liga INCONEL 718, em percentual de peso (%p). (Resende et al., 2009)

Elemento Químico	%p
C	0,042
S	0,0028
Mn	0,01
Co	0,02
Ni	52,97
Cr	18,56
Nb	5,61
Al	0,07
Ti	1,95
Mo	2,63

Para a máscara de texturização, é utilizado um adesivo plástico, por conta de suas propriedades isolantes aliadas ao seu fácil manuseio e baixo custo. As amostras de INCONEL 718 foram previamente preparadas por meio de fresamento, tanto para manter o paralelismo com a ferramenta, quanto para obter um melhor acabamento superficial ao final do processo.

As texturas da máscara são fabricadas por meio de uma máquina de corte a LASER, do fabricante ZLTech modelo E106. O LASER é emitido por um tubo de CO₂ com potência máxima de 100 W. Após o corte ter sido efetuado, o material cortado é removido, restando apenas a máscara na região onde não se quer que haja a remoção de material. Para

otimização de espaço nos corpos de prova, foram impressas três matrizes de textura em cada peça, de forma que para cada ensaio uma superfície é mantida exposta, enquanto as outras são protegidas. Posiciona-se o corpo de prova na base abaixo da ferramenta (figura 5), e mede-se a lacuna peça-ferramenta, por meio de um calibrador de folgas.

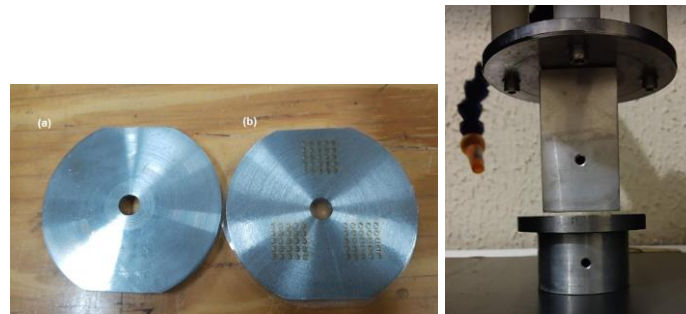


Figura 5. Corpos de prova para o ensaio (a) antes da aplicação da máscara e (b) após a aplicação da máscara, e devidamente posicionados na bancada. (Próprio Autor)

É possível visualizar as dimensões da matriz de textura aplicada em os diâmetros nominais dos furos, por meio da figura 6.

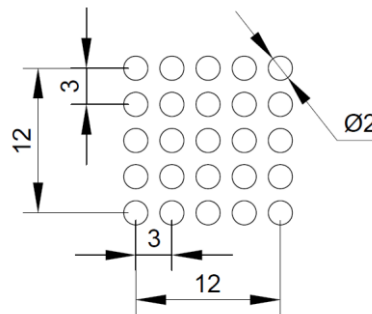


Figura 6. Matriz de textura 5x5, construída em CAD. (Próprio Autor)

2.2. Parâmetros do processo

Foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada:

- Concentração do eletrólito.
- Tempo de usinagem.
- Corrente elétrica.
- Frequência de pulso.

A concentração da solução eletrolítica foi obtida com os valores de volume da solução e massa de $NaCl$. O tempo de usinagem é aferido por meio de cronômetro digital. Por outro lado, tanto corrente elétrica, quanto frequência de pulso são dados diretamente pelo sistema elétrico da bancada.

Como parâmetro de saída do processo, foram aferidos os raios das texturas produzidas nos ensaios, por meio de microscópio.

2.3. Tratamento de dados

O sobrecorte é um efeito indesejado no processo, e por conta dessa característica, utiliza-se o critério Taguchi **menor é melhor**.

Os ensaios foram conduzidos em dois níveis, considerando variação uniforme de cada parâmetro. Será aplicada uma matriz L_8 com modelo para a análise Taguchi, indicando que foram realizados oito ensaios distintos combinando os três níveis de parâmetros.

Em Tab.2, é possível visualizar o planejamento de parâmetros dos experimentos.

Tabela 2. Planejamento de parâmetros para os ensaios. (Próprio Autor)

Parâmetro do processo	Símbolo	Nível 1	Nível 2
Concentração de eletrólito [g/L]	A	75	125
Tempo de usinagem [min]	B	3	9
Corrente elétrica [A]	C	1,5	3
Frequência [Hz]	D	30	60

Após a modelagem de dados, é realizado um teste de hipóteses, por meio de ANOVA, para obtenção da porcentagem de contribuição de cada parâmetro sobre o processo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Paralelismo entre peça e ferramenta

Para obtenção do Sobre corte resultante das texturas, foi calculado o valor médio do raio usinado em todos os 25 furos da matriz (figura 7), e para avaliar o paralelismo entre peça e ferramenta, que interfere diretamente na confiabilidade dos resultados do ensaio, compara-se o raio usinado em quatro regiões distintas das peças usinadas (figura 7)

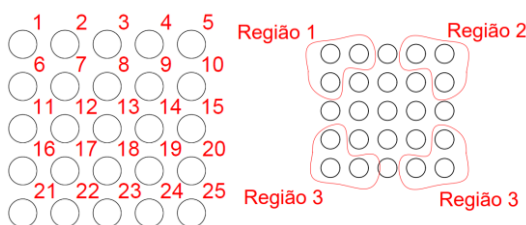


Figura 7. Numeração dos furos da textura e regiões da textura usadas para avaliar o paralelismo peça-ferramenta. (Próprio Autor)

Em figura 8, encontra-se o resultado do ensaio 4, visualizado em microscópio. Pelo gráfico de figura 9 é possível visualizar que os raios médios usinados das quatro regiões do ensaio 4 são compatíveis entre si, já que se encontram na mesma faixa de desvio padrão. Esse mesmo resultado é obtido para os outros ensaios, o que indica que o paralelismo foi atingido.

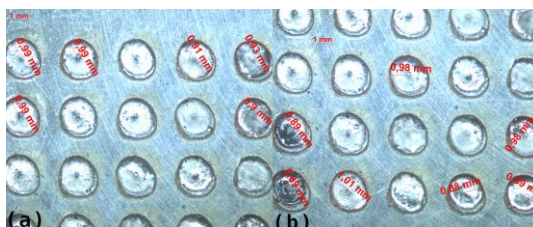


Figura 8. Partes (a) superior e (b) inferior do resultado da variação dos raios no ensaio 4. (Próprio Autor)

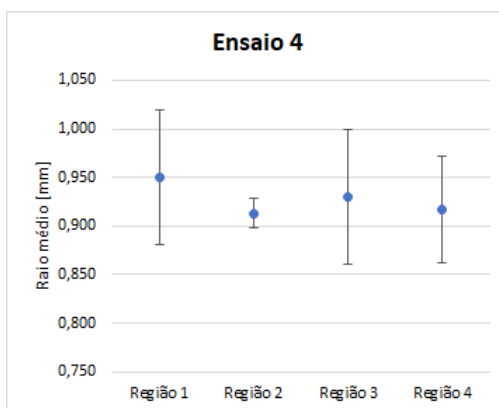


Figura 9. Resultados dos raios médios das regiões analisadas. (Próprio Autor)

3.2. Análise Taguchi

Na busca de valores de sobrecorte mais controlados, foram adotados inicialmente parâmetros de usinagem menos agressivos, para gradativamente chegar até o diâmetro nominal da textura. Porém, percebe-se nos resultados que nenhum dos ensaios atinge o sobrecorte, de forma que os diâmetros usinados são inferiores ao nominal.

Para possibilitar o estudo dos parâmetros com os resultados obtidos, optou-se por analisar o percentual de área não usinada (% $A_{n/usin}$). Esse parâmetro é a razão entre a diferença entre os valores nominal e real da área de textura usinada e o valor nominal dessa área, como pode ser visualizado na equação em Eq. (2).

$$\%A_{n/usin} = \frac{A_{nominal} - A_{real}}{A_{nominal}} \quad (2)$$

de forma que esse efeito também é indesejado no processo, mantendo assim o critério Taguchi **menor é melhor**.

Na Tabela 3, mostram-se as combinações de parâmetros ensaiadas, acompanhadas do respectivo percentual de área não usinada e relação S/R, obtida pelo método Taguchi.

Tabela 3. Combinações de parâmetros utilizadas nos ensaios, percentuais médios de área não usinada e relações S/R. (Próprio Autor)

Ensaio	A [g/L]	B [min]	C [A]	D [Hz]	%A _{n/usin}	S/R
1	75	3	1,5	30	39,59%	8,048
2	75	3	3,0	60	34,70%	9,192
3	75	9	1,5	60	33,77%	9,429
4	75	9	3,0	30	8,76%	21,151
5	125	3	1,5	60	37,66%	8,483
6	125	3	3,0	30	36,42%	8,773
7	125	9	1,5	30	19,13%	14,368
8	125	9	3,0	60	11,33%	18,914

Foi gerada a tabela que representa a resposta S/R média (Tab. 4), demonstrando o nível de desempenho de cada parâmetro no processo. Determina-se então o grau de influência desses parâmetros de usinagem, por meio de um fator Delta, definido como a diferença entre o valor mínimo e máximo das relações sinal/ruído. Quanto maior o valor de Delta, maior será o ranking de relevância do parâmetro para o processo.

Tabela 4. Resposta S/R média e nível de desenho de cada parâmetro de usinagem no processo. (Próprio Autor)

Nível	A	B	C	D
1	11,955	8,624	10,082	13,085
2	12,634	15,965	14,507	11,504
Delta	0,679	7,341	4,426	1,58
Ranking	4	1	2	3

3.3. Gráficos de efeito e S/R médios

Por meio da análise Taguchi, é possível visualizar os gráficos do efeito médio de cada parâmetro tanto sobre % $A_{n/usin}$, quanto sobre a relação S/R (figura 10).

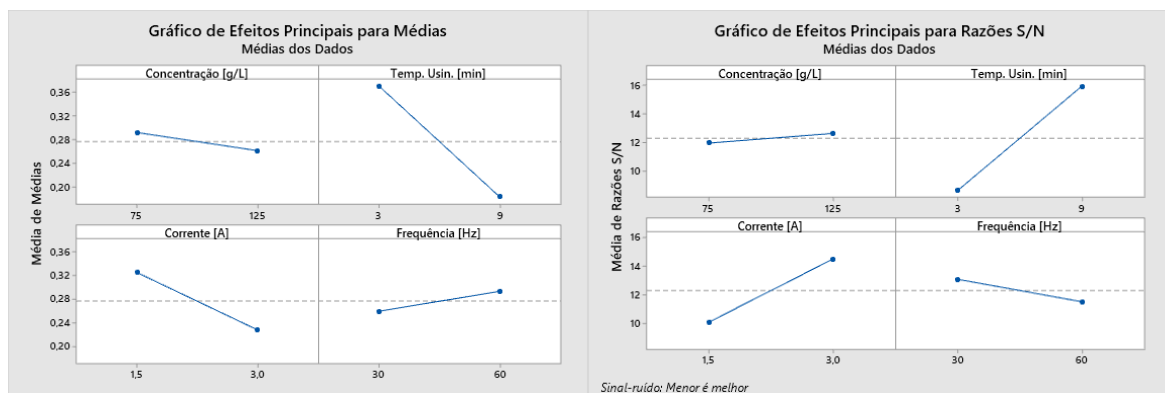


Figura 10. Efeitos médios dos parâmetros sobre % $A_{n/usin}$ e S/R. (Próprio Autor)

Por meio da análise dos gráficos e de Tab. 5, conclui-se que os parâmetros mais influentes ao processo foram tempo usinagem, seguido da corrente elétrica aplicada. A relação ótima de parâmetros, que aproxima a área usinada a nominal é dada por A2B2C2D1. É possível ver essa interação de parâmetros em Tab. 5.

Tabela 5. Combinação ótima de parâmetros que minimiza $\%A_{n/usin}$. (Próprio Autor)

A2	Cconcentração [g/L]	125
B2	Temp. Usn. [min]	9
C2	Corrente [A]	3
A1	Frequência [Hz]	30

3.4. Análise de variâncias

Tabela 6. Resultados da análise de variâncias e contribuição de cada parâmetro para o processo. (Próprio Autor)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM(Aj.)	% Contribuição
A	1	0,001888	0,001888	1,71%
B	1	0,07104	0,07104	64,42%
C	1	0,018946	0,018946	17,18%
D	1	0,002302	0,002302	2,09%
A*B	1	0,001757	0,001757	1,59%
A*C	1	0,005442	0,005442	4,94%
A*D	1	0,008897	0,008897	8,07%
Erro	0	*	*	
Total	7	0,110272		

O resultado obtido por meio de ANOVA é demonstrado em Tab. 6. É mostrada a influência de cada parâmetro de usinagem sobre $\%A_{n/usin}$. A análise de variâncias baseia-se na razão F, dada pela razão entre o quadrado médio do tratamento e o quadrado médio do erro. Esse tratamento foi realizado para uma confiabilidade de 95%.

Por meio da ANOVA, conclui-se que a contribuição do tempo de usinagem é de 64,42% sobre $\%A_{n/usin}$, seguido de 17,18% da corrente elétrica aplicada. Também foi identificado que a combinação entre a concentração do eletrólito e a frequência de pulso é de 8,07%.

3.5. Discussão

Com base nos conceitos inerentes ao processo ECM, foi possível validar a bancada experimental utilizada, demonstrando-se que o efeito da falta de paralelismo peça-ferramenta, observado por Oliveira (2019), foi mitigado.

Foi notável que uma frequência inferior a 60Hz produziu melhores resultados ao processo, tornando interessante o estudo futuro desse parâmetro. Por outro lado, percebe-se que a concentração do eletrólito não foi um parâmetro de influência direta nos resultados.

4. CONCLUSÃO

Por meio dos resultados do trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A bancada experimental utilizada, demonstrando-se que o efeito da falta de paralelismo peça-ferramenta foi mitigado.
- Os efeitos que mais influenciam no percentual de área não usinada são tempo de usinagem, seguida da corrente elétrica aplicada, com contribuição de 64,42% e 17,18%, respectivamente.
- A contribuição da combinação entre concentração do eletrólito e frequência de pulso também é notável, com um valor de 8,07%.
- A relação ótima de parâmetros que minimiza o percentual de área não usinada é dada por A2B2C2D1, indicando que dentro do intervalo de parâmetros estudado, $\%A_{n/usin}$ é diretamente proporcional a concentração do eletrólito, tempo de usinagem e corrente elétrica, enquanto é inversamente proporcional a frequência de pulso.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudo dos mesmos parâmetros pelo método fatorial, para verificar a compatibilidade de resultados entre os dois modelos estatísticos.
- Estudo mais detalhado da frequência de pulso como um parâmetro de usinagem.
- Implementação de melhorias relacionadas a vida útil dos componentes da bancada e automação do mecanismo de avanço.
- Aplicação de novas geometrias de textura na máscara.

5. REFERÊNCIAS

- Das, M. K.; Kumar, K.; Barman, T. K.; Sahoo, P. *Optimization of Surface Roughness and MRR in Electrochemical Machining of EN31 Tool Steel Using Grey-taguchi Approach*. Procedia Materials Science, v. 6, p.729–740, 2014. ISSN 2211-8128.
- Franco, G. R.; Cunha, D. F. *Avaliação da influência de parâmetros de usinagem em uma bancada de usinagem eletroquímica*. XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Brasília, 2018.
- Mcgeough, J. A. *Advanced methods of machining*. Springer Science & Business Media, Edição ilustrada, 1988.
- Melo, R. L. F. M.; Pedroza, A. D. K.; Cunha, D. F. Otimização dos parâmetros geométricos de uma bancada de usinagem pelo processo ECM. 18º Conpeex, Anais do Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão – CONPEEX, Goiânia, 2021.
- Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments*. 8. ed. [S.l.]: John wiley & sons, 2017. ISBN 1119113474.
- Oliveira, A. G. de. *Desenvolvimento de metodologia para fabricação de superfícies texturizadas por usinagem eletroquímica*. Universidade Federal de Goiás, 2019.
- Parreira, J. G. *Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento com finalidades tribológicas*. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- Resende, D. L. de; de Moura Neto, C.; Reis, D. A. P.; de Oliveira Hirschmann, A. C. *Estudo do comportamento mecânico da superliga inconel 718 em temperaturas elevadas*. 2009.
- Schubert, N.; Schneider, M.; Michaelis, A. *Electrochemical Machining of cemented carbides*. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 47, p. 54–60, 2014.
- Suarez, M. P. *Influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050*. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 1–90, 2012.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Evaluation of the machined area through the study of overcut on textured surfaces by the electrochemical machining process in Inconel 718 alloys

Rafael Loredó Felix Moreira de Melo

Daniel Fernandes da Cunha

Universidade Federal de Goiás

rafaelloredo@discente.ufg.br

danielcunha@ufg.br

Abstract. This work presents a study of the overcut in the texturizing process by electrochemical machining in INCONEL 718 alloys. The study was carried out on a bench developed at the Federal University of Goiás, using as reference concepts of unconventional machining methods, combined with studies on metal texturization in metals. The objective is to obtain the contribution of the machining parameters in the overcut and an optimal setting that minimizes this effect. The Taguchi statistical method was used to reach the objectives of the work, experimental trials were performed varying electrolyte concentration, machining time, electric current, and pulse frequency. In the trials, the overcut was not obtained, thus, the focus was directed to study the percentage of unmachined areas to understand the impact of the parameters on this effect. It was concluded that the most influential parameters in the dimension of the machined area are machining time and electric current, with contributions of 64.42% and 17.18%, respectively.

Keywords: Texturizing; Electrochemical machining; Overcut; Taguchi.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are solely responsible for the information included in this work.