

OTIMIZAÇÃO DA RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DO AÇO AISI P20 APLICANDO A RAZÃO SINAL-RUÍDO DE TAGUCHI

Étory Madrilles Arruda

João Roberto Ferreira

Universidade Federal de Itajubá - IEM - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37.500-903, Itajubá - MG

etory@msn.com; jorofe@unifei.edu.br

Guilherme Lopes Brandão

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei - DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36.307-352, São João del-Rei - MG

gui.lopes.brandão@gmail.com; lincoln@ufsj.edu.br

Resumo. Moldes e matrizes são fabricados em aços de elevada dureza, apresentando geometrias complexas e específicas baseadas no perfil do produto. No fresamento, dependendo da estratégia de corte utilizada, diferentes acabamentos são gerados e podem não corresponder ao acabamento desejado. O objetivo deste trabalho consistiu na otimização da rugosidade no fresamento do aço AISI P20 aplicando a razão Sinal-Ruído de Taguchi. Os experimentos de fresamento foram realizados com ferramentas de topo esférico com substrato de metal duro e revestimento de TiAlN. O avanço por dente, a profundidade radial de corte e o ângulo de inclinação da superfície usinada foram utilizados como variáveis de controle. A rugosidade dos corpos de prova, medida na direção de avanço da ferramenta, através do parâmetro Rz, foi analisada como resposta. Assim, pôde-se verificar que o avanço por dente e a profundidade radial de corte apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade. Verificou-se também que o ângulo de inclinação da superfície usinada apresentou interações estatisticamente significativas com o avanço por dente e com a profundidade radial de corte. Pode-se concluir que a variável de controle mais influente sobre a rugosidade foi o avanço por dente, contribuindo com 53,2% na variação da média da rugosidade.

Palavras chave: Fresamento. Topo esférico. Aço AISI P20. Rugosidade. Taguchi

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de superfícies complexas, perfiladas ou esculpidas é comum a vários segmentos da indústria, sendo a usinagem a tecnologia mais importante para a fabricação precisa destas superfícies, muito comuns em matrizes de forjamento e estampagem e em moldes para injeção de plástico (López de Lacalle e Lamikiz, 2008). De acordo com Ma *et al.* (2018) e Arruda *et al.* (2014), grande parte dos moldes e matrizes são fabricados com aços de elevada dureza - acima de 45 HRC, representando um desafio para o setor de fabricação. Segundo os autores, as operações de fresamento de aços endurecidos utilizando ferramentas topo esférico têm sido muito utilizadas em aplicações industriais, principalmente nas indústrias automotivas, de aviação e de moldes e matrizes. Isto ocorre devido à alta rigidez, versatilidade e flexibilidade que estas ferramentas apresentam na geração de formas complexas, proporcionando alta qualidade e alta produtividade.

No fresamento, dependendo da estratégia de corte utilizada, diferentes acabamentos são gerados e podem não corresponder ao acabamento desejado (Arruda *et al.*, 2014). Como os moldes e as matrizes podem apresentar diversas geometrias, conforme são projetados, as estratégias de corte geradas para o fresamento de acabamentos destes ferramentais utilizando ferramentas de topo esférico, faz com que o ponto de contato entre a ferramenta de topo esférico e a superfície usinada se altere constantemente, modificando o diâmetro efetivo de corte, a velocidade de corte e a formação dos cavacos, podendo gerar variações significativas no acabamento da superfície usinada (Ma *et al.*, 2018; Arruda *et al.*, 2014). Além disso, o estabelecimento de parâmetros de corte sem conhecimento científico também pode influenciar no controle de qualidade, na falha da ferramenta quando submetida aos esforços de corte, e até em um maior tempo de usinagem, não alcançando o nível de acabamento e a exatidão desejados para o molde ou matriz (Wojciechowski *et al.*, 2018). Desta forma, o conhecimento do acabamento superficial baseado nos parâmetros de corte e no ponto de contato da ferramenta/peça, é primordial para o controle da qualidade de um molde ou matriz. Assim, o objetivo deste trabalho consistiu na otimização da rugosidade no fresamento do aço AISI P20 aplicando a razão Sinal-Ruído de Taguchi.

2. MÉTODOS DE TAGUCHI - RAZÃO SINAL-RUÍDO (S/N)

A razão Sinal-Ruído (S/N) estuda o efeito das variáveis de controle de um determinado processo, com base no desvio dos resultados em relação a um determinado valor alvo que se refere às características pretendidas para o processo em questão (Sun *et al.*, 2015). Taguchi sugere que a razão S/N seja calculada para cada condição de teste da matriz interna

do arranjo experimental, identificando assim os níveis das variáveis de controle em que a variabilidade seja mínima. Desta forma, maximizar a razão S/N é equivalente a minimizar da perda de qualidade.

Dependendo do tipo de problema em estudo, isto é, do critério para a característica de qualidade a ser otimizada, diferentes razões S/N podem ser escolhidas, sendo elas: “*smaller is better*” (objetiva minimizar a característica de interesse), “*bigger is better*” (objetiva maximizar a característica de interesse) e “*nominal is better*” (objetiva atingir o valor nominal predeterminado). A razão S/N para o critério “*smaller is better*”, utilizada na análise dos resultados deste trabalho, pode ser definida matematicamente conforme a Eq. (1), onde y denota a característica de interesse, o subscrito i o número do experimento e n o número de réplicas do experimento i (Ross, 1991).

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de fresamento foram realizados em um centro de usinagem Discovery 560, que possui rotação máxima de 10.000 rpm e potência de 12,5 kW. Os corpos de prova utilizados são de aço ferramenta para injeção de plástico, AISI P20. Estes corpos de prova foram tratados termicamente com têmpera e revenimento, para obter uma dureza média de 46 HRC. As dimensões dos corpos de prova eram de 20 x 20 x 15 mm. Foram utilizadas ferramentas de topo esférico de 6 mm de diâmetro, com duas arestas de corte (z) e ângulo de hélice de 30°. As ferramentas eram da classe K10 e possuíam substrato de metal duro e revestimento de TiAlN.

Os experimentos de fresamento foram realizados a seco, com estratégia de fresamento em contorno e *raster* (*zig-zag*). Foram também utilizadas condições de contato ferramenta/peça que ocorrem com frequência no processo de produção de moldes, considerando o ângulo de inclinação da superfície usinada, a saber: usinagem com o centro da ferramenta (superfície usinada sem inclinação, i.e., 0°), simulando o fresamento de uma superfície plana; usinagem com o diâmetro intermediário da ferramenta (superfície usinada com inclinação de 45°) e usinagem com o diâmetro da ferramenta próximo ao diâmetro máximo (superfície usinada com inclinação de 80°). Assim, três ferramentas de corte foram utilizadas, uma para cada ângulo de inclinação. Outras duas variáveis de controle também foram utilizadas nos experimentos, sendo elas: o avanço por dente e a profundidade radial de corte. A Tabela 1 apresenta as três variáveis de controle utilizadas nos experimentos, assim como seus respectivos níveis.

Tabela 1. Variáveis de controle e seus respectivos níveis

Variáveis de controle	Níveis		
	1	2	3
A - Avanço por dente [mm/z]	0,05	0,10	0,15
B - Profundidade radial de corte [mm]	0,05	0,10	0,20
C - Ângulo de inclinação da superfície usinada [°]	0	45	80

Em todos os experimentos a rotação da ferramenta foi mantida constante em 7.500 rpm e a profundidade axial de corte em 0,20 mm e as velocidades de corte foram obtidas de acordo com o ângulo de inclinação da superfície usinada. Dessa forma, as velocidades de corte utilizadas foram de 50,8 m/min para o fresamento simulando uma superfície plana, de 100,0 m/min para o fresamento com inclinação de 45° e de 139,2 m/min para fresamento com inclinação de 80°.

O arranjo ortogonal L27 de Taguchi é composto por vinte e sete experimentos previamente configurados e foi selecionado por sua capacidade de comportar as três variáveis de controle com seus três níveis de atuação. A resposta analisada foi a rugosidade dos corpos de prova, avaliada através do parâmetro R_z , medida na direção de avanço da ferramenta de corte. Para realizar as medições de rugosidade foi utilizado rugosímetro portátil Mitutoyo® SurfTest SJ 400, configurado com comprimento de amostragem (*cut-off*) igual a 0,80 mm. Foram realizadas três medições de rugosidade para cada experimento. Para se obter as variáveis de controle que minimizam a variabilidade da rugosidade R_z , utilizou-se a razão S/N proposta por Taguchi (Ross, 1991).

4. RESULTADOS

A razão S/N é a principal característica do método de Taguchi numa análise experimental. Para determinar a melhor combinação de níveis das variáveis de controle que minimize a variabilidade da rugosidade R_z , a razão S/N “*smaller is better*” foi selecionada para a análise dos dados. A Tabela 2 apresenta o arranjo ortogonal L27 utilizado nos experimentos deste trabalho, assim como os valores médios, os desvios-padrão e as razões S/N obtidos para a rugosidade R_z . De acordo com a Tab. 2, verifica-se que foram obtidos valores médios de rugosidade R_z entre 2,17 e 8,07 μm . Os valores para o desvio-padrão variaram entre 0,06 e 1,71 μm .

Tabela 2. Arranjo ortogonal L27, médias, desvios-padrão e razões S/N para a rugosidade Rz

Exp.	fz [mm/z]	ae [mm]	ϕ [°]	Rz [μm]	Std [μm]	S/N [dB]	Exp.	fz [mm/z]	ae [mm]	ϕ [°]	Rz [μm]	Std [μm]	S/N [dB]
1	0,05	0,05	0	2,67	0,32	-8,56	15	0,10	0,10	80	8,07	0,31	-18,14
2	0,05	0,05	45	3,27	0,31	-10,31	16	0,10	0,20	0	4,40	0,82	-12,97
3	0,05	0,05	80	2,17	0,21	-6,74	17	0,10	0,20	45	3,70	0,10	-11,37
4	0,05	0,10	0	2,50	0,61	-8,13	18	0,10	0,20	80	6,30	0,53	-16,01
5	0,05	0,10	45	3,20	0,20	-10,11	19	0,15	0,05	0	4,33	0,40	-12,76
6	0,05	0,10	80	2,63	0,35	-8,46	20	0,15	0,05	45	4,07	0,21	-12,19
7	0,05	0,20	0	3,13	0,49	-9,99	21	0,15	0,05	80	3,47	0,50	-10,86
8	0,05	0,20	45	2,80	0,36	-8,99	22	0,15	0,10	0	5,00	1,71	-14,30
9	0,05	0,20	80	2,67	0,25	-8,55	23	0,15	0,10	45	4,70	0,10	-13,44
10	0,10	0,05	0	2,73	0,49	-8,83	24	0,15	0,10	80	3,90	0,36	-11,85
11	0,10	0,05	45	3,23	0,15	-10,20	25	0,15	0,20	0	6,00	0,53	-15,59
12	0,10	0,05	80	6,73	0,67	-16,59	26	0,15	0,20	45	4,67	0,12	-13,38
13	0,10	0,10	0	4,40	0,20	-12,88	27	0,15	0,20	80	2,93	0,12	-9,35
14	0,10	0,10	45	3,73	0,06	-11,44	-	-	-	-	-	-	-

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises de variância (ANOVA) para a razão S/N, para a média e para o desvio-padrão da rugosidade Rz, considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$. Analisando o P-valor, pode-se verificar que o avanço por dente (A) e a profundidade radial de corte (B) apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz. Segundo Chen *et al.* (2005), nas operações de acabamento com ferramentas de topo esférico, a superfície usinada é formada não apenas pela seção dos deslocamentos radiais da trajetória da ferramenta, mas também pelo material residual deixado nos espaços entre os sucessivos giros da aresta de corte durante o movimento de avanço. Desta forma, a superfície usinada apresenta geometria tridimensional, sendo a rugosidade diretamente afetada pelo avanço por dente e pela profundidade radial de corte.

Tabela 3. Análises de variância para a razão S/N, para a média e para o desvio-padrão da rugosidade Rz

Fonte	GL	ANOVA – Razão S/N				ANOVA – Rz				ANOVA – Std			
		SQ	MQ	F	P	SQ	MQ	F	P	SQ	MQ	F	P
A	2	98,45	49,23	50,93	0,000	20,32	10,16	60,32	0,000	0,05	0,03	0,36	0,711
B	2	8,42	4,21	4,35	0,053	1,77	0,88	5,25	0,035	0,03	0,01	0,18	0,840
C	2	1,45	0,72	0,75	0,503	1,75	0,87	5,19	0,036	0,88	0,44	5,85	0,027
A*B	4	2,83	0,71	0,73	0,595	0,98	0,25	1,46	0,300	0,50	0,13	1,66	0,251
A*C	4	87,14	21,79	22,54	0,000	25,45	6,36	37,78	0,000	0,40	0,10	1,31	0,344
B*C	4	8,73	2,18	2,26	0,152	2,23	0,56	3,32	0,070	0,31	0,08	1,03	0,448
Resíduo	8	7,73	0,97			1,35	0,17			0,60	0,08		
Total	26	214,75				53,84				2,78			
R ² (adj.)				88,3%				91,9%				29,3%	

De acordo com a Tab. 3, verifica-se que o ângulo de inclinação da superfície usinada (C) apresentou influência estatisticamente significativa sobre a média e sobre o desvio-padrão da rugosidade Rz. Além disso, este também apresentou interação estatisticamente significativa com o avanço por dente (A*C) sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz. De acordo com Ma *et al.* (2018) e Arruda *et al.* (2014), a variação do ângulo de inclinação modifica o ponto de contato entre a ferramenta de topo esférico e a superfície usinada, alterando o diâmetro efetivo de corte, a velocidade de corte e a formação dos cavacos, o que pode justificar a influência desta variável sobre as respostas.

Ainda de acordo com a Tab. 3, analisando o F-valor para a razão S/N e para a média da rugosidade Rz, pode-se verificar que o avanço por dente (A) é a variável de controle que apresenta maior influência na variação destas respostas, contribuindo com 62,4% e 53,2%, respectivamente. Uma vez que a rugosidade foi medida na direção de avanço da ferramenta de corte, este é um resultado esperado, e foi também verificado por Arruda *et al.* (2014). Analisando o F-valor da interação entre o avanço por dente e o ângulo de inclinação da superfície usinada (A*C) sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz, verifica-se que esta contribui, respectivamente, com 27,6% e 33,3% na variação das respostas. A profundidade radial de corte (B), contribui com 5,3% e 4,6%, e o ângulo de inclinação da superfície usinada (C) contribui com 4,6% na variação da média da rugosidade Rz. Analisando o F-valor para o desvio-padrão da rugosidade Rz, pode-se verificar que o ângulo de inclinação da superfície usinada (C) é a variável de controle que apresenta maior influência na variação desta resposta, contribuindo com 56,3%.

A Figura 1 ilustra os efeitos principais das variáveis de controle sobre a razão S/N, a média e o desvio-padrão da rugosidade Rz. Com base na estatística delta (Δ), que compara a magnitude relativa dos efeitos de cada nível de cada variável de controle, é possível verificar que o avanço por dente é a variável de controle que apresenta maior influência sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz, sendo seguida pela profundidade radial de corte e pelo ângulo de inclinação da superfície usinada, respectivamente. Com relação ao desvio-padrão da rugosidade Rz, o ângulo de inclinação da superfície usinada é a variável de controle que apresenta maior influência, sendo seguida pelo avanço por dente e pela profundidade radial de corte.

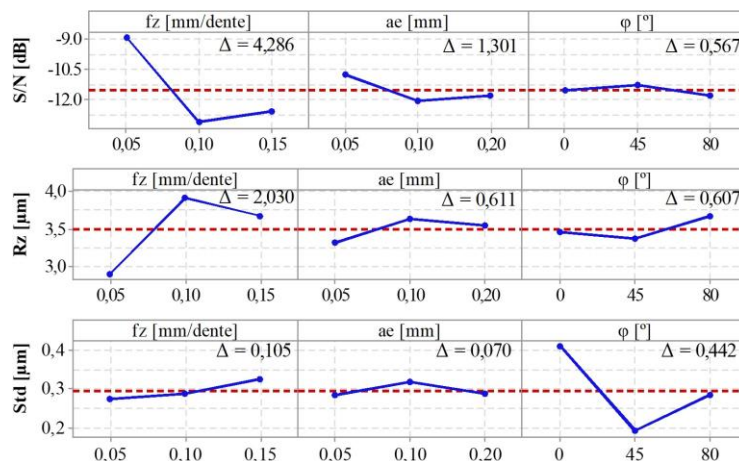


Figura 1. Efeitos principais das variáveis de controle sobre a razão S/N, a média e o desvio-padrão da rugosidade Rz

De acordo com Ross (1991) a maximização da razão S/N sempre proporciona a melhor qualidade com mínima variação. Desta forma, o nível de cada variável de controle que apresenta o maior valor de razão S/N é definido como sendo o nível ideal para cada variável de controle. Portanto, de acordo com a Fig. 1, a melhor combinação das variáveis de controle que proporciona os menores valores de rugosidade Rz, foram: avanço por dente de 0,05 mm/z, profundidade radial de corte de 0,05 mm e ângulo de inclinação da superfície usinada de 45°. A Tabela 4 apresenta, para esta combinação ótima das variáveis de controle, os valores obtidos experimentalmente e os valores ótimos preditos pelo método de Taguchi para a razão S/N, para a média e para o desvio-padrão da rugosidade Rz. Desta forma, pode-se verificar que os dados obtidos experimentalmente e os dados preditos são bastante próximos, confirmando os resultados.

Tabela 4. Confirmação dos resultados obtidos

Dados	S/N [dB]	Rz [μm]	Std [μm]
Experimental	-10,31	3,27	0,31
Predito - Taguchi	-9,87	3,17	0,29
Desvio relativo	4,27%	3,06%	6,45%

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos na análise da rugosidade usando o método Taguchi no fresamento com ferramentas de topo esférico, as seguintes conclusões podem ser obtidas.

- O método de Taguchi mostrou-se eficiente e adequado para identificar de maneira satisfatória a influência de cada variável de controle sobre a razão S/N e sobre a média e o desvio-padrão da rugosidade Rz;
- O avanço por dente e a profundidade radial de corte apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz;
- O ângulo de inclinação da superfície usinada apresentou influência estatisticamente significativa sobre a média e o desvio-padrão da rugosidade Rz;
- A interação do ângulo de inclinação da superfície usinada com avanço por dente apresentou influência estatisticamente significativa sobre a razão S/N e sobre a média da rugosidade Rz;
- O avanço por dente foi a variável de controle que mais influenciou a razão S/N e a média da rugosidade Rz;
- O ângulo de inclinação da superfície usinada foi a variável de controle que mais influenciou o desvio-padrão da rugosidade Rz;
- A combinação ótima dos níveis das variáveis de controle que minimizam a rugosidade Rz é composta por avanço por dente de 0,05 mm/z, profundidade radial de corte de 0,05 mm e ângulo de inclinação da superfície usinada de 45°.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, a CAPES, o CNPq, a UFSJ e a UNIFEI pelo apoio na realização deste trabalho e na participação no COBEF 2019.

7. REFERÊNCIAS

- Arruda, E.M., Brandão, L.C., Ribeiro Filho, S.L.M. e Oliveira, J.A., 2014. "Integrated optimization using mixture design to confirm the finishing of AISI P20 using different cutting strategies and ball nose end mills". *Measurement*, Vol. 47, p. 54-63.
- Chen, J.S., Huang, Y.K., Chen, M.S., 2005. "A study of the surface scallop generation mechanism in the ball-end milling process". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.45, n. 9, p. 1077-1084.
- López de Lacalle, L.N. e Lamikiz, A., 2008. *Sculptured surface machining*. In: Davim, J.P., *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer-Verlag London, Londres, p. 225-248.
- Ma, J., Hu, G., Jia, Z., Zhang, N. e Wang, F., 2018. "Effect of geometric feature and cutting direction on variation of force and vibration in high-speed milling of TC4 curved surface". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, n. 5-8, p. 2207-2218.
- Ross, P., 1991. *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw Hill, New York.
- Sun, G., Fang, J., Tian, X., Li, G. e Li, Q., 2015. "Discrete robust optimization algorithm based on Taguchi method for structural crashworthiness design". *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, n. 9, p. 4482-4492.
- Wojciechowski, S., Maruda, R.W., Krolczyk, G.M. e Nieslony, P., 2018. "Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling". *Precision Engineering*, Vol. 51, p. 582-596.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ROUGHNESS OPTIMIZATION IN THE MILLING OF THE AISI P20 APPLYING THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO OF TAGUCHI

Étory Madrilles Arruda

João Roberto Ferreira

Federal University of Itajubá - IEM - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37.500-903, Itajubá - MG
etory@msn.com; jorofe@unifei.edu.br

Guilherme Lopes Brandão

Lincoln Cardoso Brandão

Federal University of São João del-Rei - DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36.307-352, São João del-Rei - MG
gui.lopes.brandão@gmail.com; lincoln@ufsj.edu.br

Abstract. Moulds and dies are manufactured from high hardness steels and have complex and specific geometries based on the product profile. In the milling process, depending on the cutting strategy used, different finishes are generated and may not correspond to the desired finish for the product. Based on this, this work aims to optimize the roughness in the milling of AISI P20 steel, applying the Signal-to-Noise ratio of Taguchi. The milling experiments were performed with ball nose carbide tools with TiAlN coating. The feed rate per tooth, the radial depth of cut and the machined surface inclination angle were used as input variables. The surface roughness of the workpieces was used as response being measured in the feed rate direction through the Rz parameter. Thus, it was possible to verify that the feed rate per tooth and the radial depth of cut had a statistically significant influence on the surface roughness. Furthermore, the machined surface inclination angle showed statistically significant interaction with the feed rate per tooth. It can be concluded that, the most influential input variable on surface roughness was the feed rate per tooth, contributing with 53.2% in the surface roughness variation.

Keywords: Milling. Ball Nose. AISI P20 Steel. Roughness. Taguchi

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.