

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE FRESAMENTO UTILIZADOS OS METÓDOS DE TAGUCHI E ANOVA

OPTIMIZATION OF MILLING PARAMETERS USING TAGUCHI AND ANOVA METHODS

Efigenio Rodrigues da Costa Júnior* E-mail: efigenio.costa@hotmail.com

*Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, Brasil.

Resumo: O processo de fresagem consiste na remoção do excesso de metal da superfície de uma peça. A melhoria de desempenho do processo de fresamento depende intrinsecamente da redução de variabilidade nas características críticas de qualidade definidas para os produtos. O método é baseado no planejamento de experimentos, usando as matrizes ortogonais e análise estatística de dados. De acordo com as características e objetivo do experimento, a equação utilizada para determinar o S/N foi a de menor melhor. O objetivo do experimento foi encontrar uma combinação de parâmetros de fresamento para atingir baixa rugosidade na peça. Analisado a interferências dos parâmetros de corte ap , fz , ae e vc na obtenção da rugosidade e força de corte. Para os resultados de rugosidade e força resultante nenhuma interação foi significativa. Como a rugosidade é um dos requisitos do cliente, analisou-se a melhor combinação para a rugosidade. A melhor combinação apresentava um avanço de dente (fz) em 0,05 (mm/dente) e a profundidade de corte (ap) em 1,125 (mm).

Palavras-chave: Fresamento. Rugosidade. DOE. Método de Taguchi.

Abstract: The milling process consists of removing excess metal from the surface of a part. Improving the performance of the milling process intrinsically depends on the reduction of variability in the critical quality characteristics defined for the products. The method is based on the design of experiments, using orthogonal matrices and statistical data analysis. According to the characteristics and purpose of the experiment, the equation used to determine the S/N was the lowest best. The objective of the experiment was to find a combination of milling parameters to achieve low roughness on the workpiece. Analyzed the interference of cutting parameters ap , fz , ae and vc in obtaining roughness and cutting force. For the results of roughness and resultant strength, no interaction was significant. As roughness is one of the customer's requirements, the best combination for roughness was analyzed. The best combination had a tooth feed (fz) at 0.05 (mm/tooth) and the depth of cut (ap) at 1.125 (mm).

Keywords: Milling. Roughness. DOE. Taguchi method.

1 INTRODUÇÃO

A fresagem é um processo de usinagem feito por máquinas denominadas fresadoras e ferramentas chamadas fresas. A fresagem consiste na remoção do excesso de metal da superfície de uma peça para que esta tenha forma e acabamentos desejados. A retirada do sobremetal na peça é feita pela combinação de dois movimentos simultâneos: o movimento de rotação da ferramenta (fresa) e o movimento da mesa da máquina (onde é fixada a peça a ser usinada). É o

movimento da mesa da máquina ou movimento de avanço que leva a peça até a fresa e possibilita a usinagem (KHANNA *et al.*, 2017, DINIZ *et al.*, 2017).

A melhoria de desempenho do processo de fresamento depende intrinsecamente da redução de variabilidade nas características críticas de qualidade definidas para os produtos. Tal variabilidade é provocada pela adoção de setups inadequados para as variáveis de controle do processo e pela presença de variáveis de ruído que, reconhecidas ou não, aumentam o deslocamento da média em relação a valores alvo desejados (BRITO *et al.*, 2014).

O uso do planejamento de experimentos pode diminuir tempo e custos pela redução do número de experimentos necessários durante a identificação de um setup ótimo. O método de Taguchi é utilizado como uma ferramenta para controle da qualidade para fins de otimização de processos e é eficaz na investigação dos efeitos de múltiplos fatores sobre o desempenho, bem como para estudar a influência de fatores individuais para determinar qual fator tem mais influência (GHANI *et al.*, 2004).

O método é baseado no planejamento de experimentos, usando as matrizes ortogonais e análise estatística de dados. Existem duas abordagens de análise de dados com a finalidade de determinar os níveis ótimos dos parâmetros e a sua influência no processo: a primeira é a análise média (determinação dos efeitos principais e interações) e análise da variância (ANOVA), trata as respostas em termos de razão sinal-ruído (S/N) (RAVINDRANATH *et al.*, 2017).

Este artigo utiliza o processo de fresamento de topo e descreve um estudo sobre parâmetros de corte em três níveis cada com quatro variáveis de controle. O objetivo do experimento é encontrar uma combinação de parâmetros de fresamento para atingir baixa rugosidade na peça.

2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO E MÉTODO DE TAGUCHI

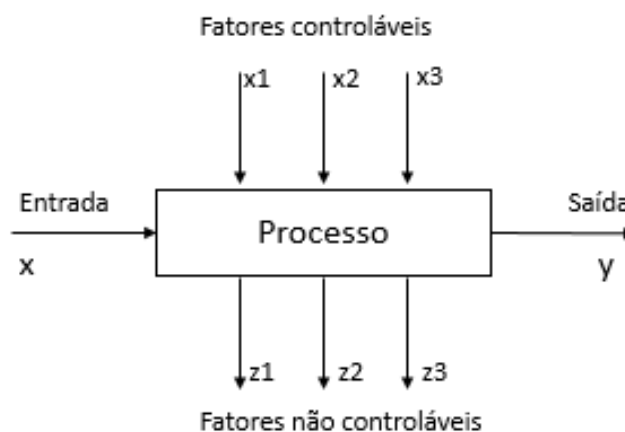
2.1 Planejamento do Experimento

O planejamento de experimento é uma técnica poderosa usada para explorar novos processos, obtendo maior conhecimento dos processos existentes e otimizando esses processos para alcançar um desempenho de classe mundial. A aplicação do DOE ajuda a planejar o trabalho de pesquisa e experimentação. A maior vantagem deste método é a economia de tempo experimental, reduzindo o custo e descobrindo rapidamente fatores significativos (GHALME *et al.*, 2016).

Segundo Wang *et al.* (2017), o projeto de experimentos fornece um meio poderoso para alcançar melhorias significativas na qualidade do produto e eficiência do processo. Do ponto de vista da área de manufatura, pode-se reduzir a quantidade de experimentos necessários quando se leva em conta os inúmeros fatores que afetam o resultado experimental (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Montgomery (2009), os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do projeto de experimentos são melhoria do rendimento dos processos, redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais, redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos e finalmente redução de custos. De acordo com Montgomery (2009), projetos de experimentos geralmente são utilizados para estudar o desempenho de sistemas ou processos, onde o processo será responsável por transformar a entrada (input), em uma saída (output), figura 1.

Figura 1 – Fatores de um processo



Fonte: MONTGOMERY, 2009.

2.2 Método de Taguchi

O Método Taguchi pode ser compreendido como uma abordagem da qualidade voltada para o projeto, do processo e/ou do produto. A proposta do método consiste em determinar, empregando técnicas estatísticas, a função perda do produto e otimizá-la; permitindo identificar os parâmetros ótimos de projeto que eliminam ou minimizam as influências dos fatores ruídos no comportamento do produto. A vantagem deste método é possibilitar ao pesquisador a utilização de inúmeras informações conhecidas sobre o processo, contudo realizando um número mínimo de experimentos com base nos arranjos ortogonais (ANTONY *et al.*, 2006).

Segundo Almeida e Toledo (1989), Taguchi define o que este chamou de Controle da Qualidade Off-line, que consiste em etapas que serão desenvolvidas buscando-se obter produtos de alta qualidade e baixo custo (Quadro 1).

Quadro 1 – Etapas a seguir do método de Taguchi

Taguchi - Controle da Qualidade off-line	
Etapa 1	Identificar os ruídos e os parâmetros de projeto ou processo que afetam significativamente o desempenho e que possam ser manipulados, bem como os seus níveis potenciais.
Etapa 2	Realizar experimentos fatoriais fracionados no produto e no processo utilizando-se da matriz ortogonal
Etapa 3	Analisar os resultados dos experimentos para determinar o nível ótimo de operação dos parâmetros estudados
Etapa 4	Realizar um experimento de confirmação para certificar-se que esse nível de operação dos parâmetros realmente melhora a qualidade

Fonte: adaptado de FARIA *et al.*, 2017.

Segundo Maiyar *et al.* (2013), Taguchi desenvolveu uma transformação dos dados de respostas em valores relacionados com a variação presente devido aos ruídos, conhecida como razão sinal-ruído (S/R) que podem ser usadas de acordo com os objetivos desejados. As características da relação S/N podem ser divididas em três categorias quando a característica é contínua: nominal melhor, menor melhor e maior melhor.

O conceito de razão S/N é útil na melhoria da qualidade através da redução da variabilidade e a melhoria da medição. As características da relação S/N podem ser divididas em três categorias quando a característica é contínua, conforme equações 1 a 3:

- Nominal melhor – NB:

$$S/N = 10 \log \frac{\bar{y}}{s_y^2}$$

- Menor melhor –LB:

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right)$$

- Maior melhor – HB:

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$$

Onde:

- \bar{y} = média dos dados observados,

- s_y^2 = variância de y,
- n = número de observações,
- y = dados observados.

Para executar o método de Taguchi é necessária estabelecer uma estratégia de implementação. O primeiro passo é estabelecer os fatores de controle, que afetam a variabilidade do processo conforme medido pela relação S / N. Após, identificar os fatores de sinal, que não influenciam a relação S / N ou o processo, significam. Identificar os fatores, que não afetam a relação S / N ou o processo.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o projeto, foi utilizado o processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045 em três níveis e com 4 fatores (velocidade de corte - *vc*, avanço por dente - *fz*, profundidade de corte - *ap* e penetração - *ae* de 16,5 mm) sendo que a última delas terá um valor fixo.

O planejamento fatorial fracional utilizado é uma matriz ortogonal L27 padrão. Este conjunto ortogonal foi escolhido devido à sua capacidade de verificar as interações entre os fatores. Cada linha da matriz representa um teste. No entanto, a sequência em que estes ensaios são realizados é randomizada. Os três níveis de cada fator são representados por '-1', '0', '1' na matriz.

Os fatores e níveis foram atribuídos como na tabela 1, de acordo com as condições de finalização e do referido material à usinagem a alta velocidade de corte.

Tabela 1 – Fatores e níveis da matriz do experimento

Fatores	Símbolo	Níveis		
		-1,0	0,0	1,0
Avanço por dente	<i>fz</i> (mm/dente)	0,1	0,15	0,2
Profundidade de usinagem	<i>ap</i> (mm)	0,75	1,125	1,5
Velocidade de corte	<i>vc</i> (m/min)	300	325	350
Penetração de trabalho	<i>ae</i> (mm)	16,5	16,5	16,5

Fonte: Autoria própria.

Os fatores A, B e C estão dispostos nas colunas 2, 5 e 6, respectivamente, na matriz ortogonal L27 da Tabela 2.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Automação da Manufatura da Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira. A máquina-ferramenta utilizada

foi um centro de usinagem CNC marca Fadal com potência de 15 kW e máxima rotação de 7500 rpm.

Durante os ensaios, utilizou-se a fresa de topo código R390-025A25-11M (Sandvik-Coromant) diâmetro 25 mm, ângulo de posição $\chi_r = 90^\circ$ graus, haste cilíndrica, passo médio com três insertos e fixação mecânica por pinça. Na fresa foram usados insertos de metal duro ISO P25, revestidos com nitreto de titânio (TiN), código R390-11T308M-PM GC 1025 (Sandvik-Coromant)

Tabela 2 – Matriz ortogonal L27 padrão

Experimental run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	1	1	2	0
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	0	2	0	1
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2
19	2	0	2	0	0	2	1	0	2	1	0	2	1
20	2	0	2	0	1	0	2	1	0	2	1	0	2
21	2	0	2	0	2	2	0	2	1	0	2	1	0
22	2	1	0	1	0	0	1	1	0	2	2	1	0
23	2	1	0	1	1	1	2	2	1	0	0	2	1
24	2	1	0	1	2	0	0	0	2	1	1	0	2
25	2	2	1	2	0	2	1	2	1	0	1	0	2
26	2	2	1	2	1	0	2	0	2	1	2	1	0
27	2	2	1	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1
	B x C	A			B	C	B x C	A x B	A x C		A x B	A x C	

Fonte: Ross, 1991.

A tabela 3 mostra a composição química do material de trabalho em porcentagem em peso.

Tabela 3 – Composição química (%) do aço ABNT 1045

Material	C	Mn	P _{máx}	S _{máx}
Aço ABNT 1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,04	0,05

Fonte: Brito *et al.*, 2014.

De acordo com as características e objetivo do experimento, a equação utilizada para determinar o S/N foi a de menor melhor, ou seja:

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right)$$

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para medir o significado dos parâmetros do processo do desenho experimental na característica de qualidade a um nível de confiança específica, por meios e relações S/N. Para a superfície de resposta do corte específico e rugosidade de superfície no fresamento de topo foi realizada para verificar a qualidade dos modelos e determinação das principais e menores influências dos fatores no processo.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS

A otimização dos experimentos para minimizar os efeitos da rugosidade na superfície e a força resultante aplicada na peça. Conforme a tabela 4, os dados reais para a rugosidade e a força resultante, juntamente com a razão sinal-ruído (S/N) média para cada nível da rugosidade e força resultante.

Foi realizado um plano experimental que foi especificado em um nível de confiança de 95%.

Tabela 4 – Resultados experimentais para rugosidade, força resultante e os S/N correspondentes (continua)

Experimentos	Fator			Parâmetros Mensurados		Relação S / N calculada	
	fz	ap	vc	Rigidez da superfície, Ra (µm)	Força resultante (N)	Relação S / N para rugosidade superfície	Relação S / N para força resultante
1	0,1	0,75	300	1,200	3819,719	5,40608	-64,65093
2	0,2	0,75	300	2,000	3819,719	0,96910	-64,65093
3	0,1	1,5	300	1,200	3819,719	5,40608	-64,65093
4	0,2	1,5	300	1,500	3819,719	3,46787	-64,65093
5	0,1	0,75	350	1,200	4456,338	5,40608	-65,98986
6	0,2	0,75	350	2,100	4456,338	0,54531	-65,98986
7	0,1	1,5	350	1,100	4456,338	6,16185	-65,98986
8	0,2	1,5	350	1,700	4456,338	2,38072	-65,98986
9	0,1	0,75	300	1,000	3819,719	6,98970	-64,65093
10	0,2	0,75	300	1,700	3819,719	2,38072	-64,65093
11	0,1	1,5	300	1,200	3819,719	5,40608	-64,65093
12	0,2	1,5	300	1,800	3819,719	1,88425	-64,65093
13	0,1	0,75	350	1,200	4456,338	5,40608	-65,98986
14	0,2	0,75	350	2,000	4456,338	0,96910	-65,98986
15	0,1	1,5	350	1,200	4456,338	5,40608	-65,98986
16	0,2	1,5	350	1,700	4456,338	2,38072	-65,98986

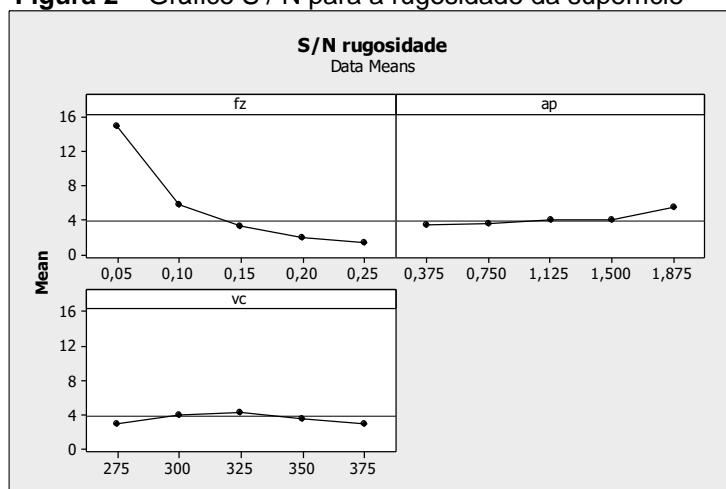
17	0,05	1,125	325	0,400	4138,029	14,94850	-65,34617
18	0,25	1,125	325	1,900	4138,029	1,41463	-65,34617
19	0,15	0,375	325	1,500	4138,029	3,46787	-65,34617
20	0,15	1,875	325	1,200	4138,029	5,40608	-65,34617
21	0,15	1,125	275	1,570	3501,409	3,07171	-63,89516
22	0,15	1,125	375	1,590	4774,648	2,96176	-66,58913
23	0,15	1,125	325	1,590	4138,029	2,96176	-65,34617
24	0,15	1,125	325	1,570	4138,029	3,07171	-65,34617
25	0,15	1,125	325	1,560	4138,029	3,12721	-65,34617
26	0,15	1,125	325	1,580	4138,029	3,01656	-65,34617
27	0,15	1,125	325	1,550	4138,029	3,18307	-65,34617

Fonte: Autoria própria.

4.1 Abordagem conceitual da relação S/N

A proporção S/N para rugosidade é mostrada na figura 2. Sugere-se que o fator avanço por dente (*fz*) é o mais significativo. A profundidade de corte e a velocidade de corte (*vc*) são insignificantes para o resultado do sinal-ruído da rugosidade. Essas informações foram confirmadas com a análise do *p-value* dos fatores (Tabela 5). Vale ressaltar, nenhuma das interações apresentaram significância para o resultado do sinal-ruído da rugosidade (Tabela 6).

Figura 2 – Gráfico S / N para a rugosidade da superfície



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Análise de Variância para o resultado do sinal-ruído da rugosidade

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	138,614	138,614	138,614	49,140	0,000
<i>ap</i>	1	2,869	2,869	2,869	1,020	0,324
<i>vc</i>	1	0,441	0,441	0,441	0,160	0,696
Error	23	64,875	64,875	2,821		
Total	26	206,799				
S = 1,67947		R-Sq = 68,63%		R-Sq (adj) = 64,54%		

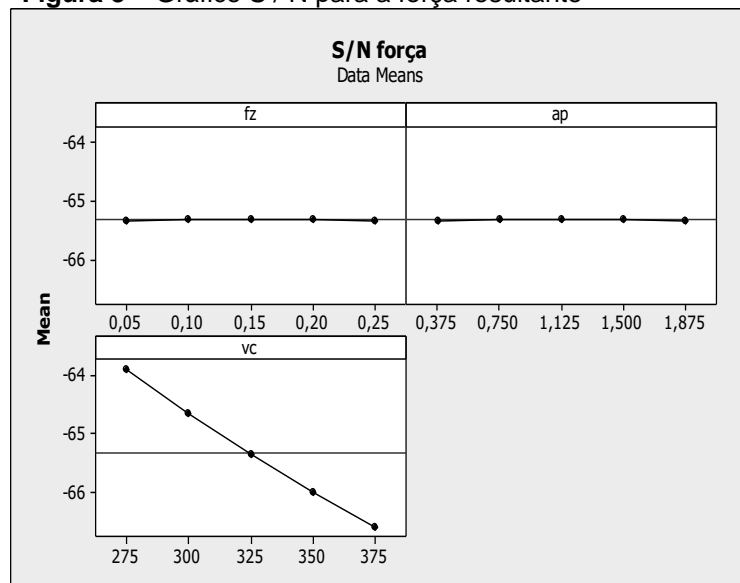
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Análise de Variância dos fatores e interações para o S/N rugosidade

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	138,614	0,227	0,227	0,07	0,794
<i>ap</i>	1	2,869	0,382	0,382	0,12	0,735
<i>vc</i>	1	0,441	0,203	0,203	0,06	0,805
<i>fz*ap</i>	1	2,308	0,152	0,152	0,05	0,831
<i>fz*vc</i>	1	0,160	0,018	0,018	0,01	0,942
<i>ap*vc</i>	1	0,803	0,295	0,295	0,09	0,766
<i>fz*ap*vc</i>	1	0,075	0,075	0,075	0,02	0,881
Error	19	61,529	61,529	3,238		
Total	26	206,799				
S = 1,79954		R-Sq = 70,25%		R-Sq (adj) = 59,29%		

Fonte: Autoria própria.

A proporção S/N para força é mostrada na figura 3. Estudo sugere que o fator velocidade de corte (*vc*) é mais significativo em relação ao sinal-ruído da força resultante. Os demais fatores não apresentaram significância. Essas informações foram confirmadas com a análise do *p-value* dos fatores (Tabela 7). Vale ressaltar, que nenhuma das interações apresentaram significância para o resultado da rugosidade (Tabela 8).

Figura 3 – Gráfico S / N para a força resultante

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Análise de Variância para o sinal-ruído da força resultante

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>ap</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>vc</i>	1	10,7997	10,7997	10,7997	13722,19	0,000
Error	23	0,0181	0,0181	0,0008		
Total	26	10,8178				
S = 0,0280539		R-Sq = 99,83%		R-Sq (adj) = 99,81%		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Análise de Variância dos fatores e interações para o S/N força resultante

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>ap</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>vc</i>	1	10,7997	0,0722	0,0000	75,82	0,000
<i>fz*ap</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>fz*vc</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>ap*vc</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
<i>fz*ap*vc</i>	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Error	19	0,0181	0,0181	0,001		
Total	26	10,8178				
S = 0,0308660		R-Sq = 99,83%		R-Sq (adj) = 99,77%		

Fonte: Autoria própria.

Analisando o resultado rugosidade, dois fatores apresentaram significância, avanço por dentes (*fz*) e profundidade de corte (*ap*). O fator velocidade de corte (*vc*) não apresentou significância. Analisando as interações, nenhum dos fatores apresentaram significância (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9 – Análise de Variância para o resultado da rugosidade

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	2,80167	2,80167	2,80167	111,98	0,000
<i>ap</i>	1	0,10667	0,10667	0,10667	4,26	0,050
<i>vc</i>	1	0,01707	0,01707	0,01707	0,68	0,417
Error	23	0,57547	0,57547	0,02502		
Total	26	3,50087				
S = 0,158178		R-Sq = 83,56%		R-Sq (adj) = 81,42%		

Fonte: Autoria própria.

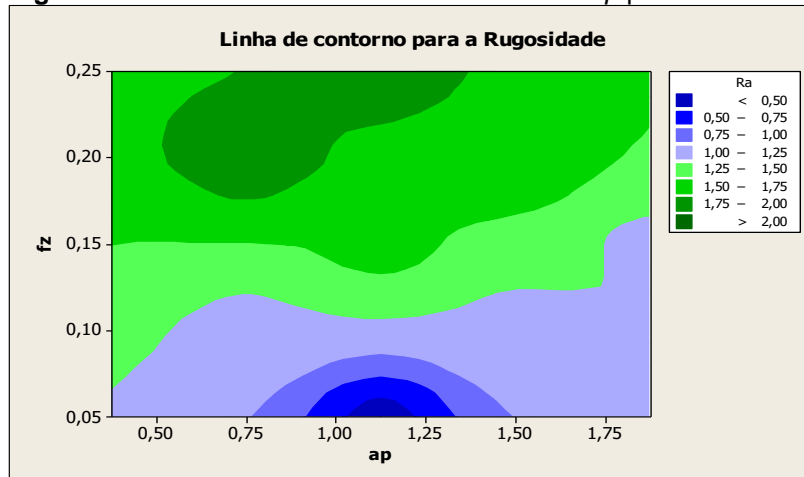
Tabela 10 – Análise de Variância dos fatores e interações para a rugosidade

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>fz</i>	1	2,80167	0,00000	0,00000	0,02	0,881
<i>ap</i>	1	0,10667	0,00393	0,00393	0,16	0,689
<i>vc</i>	1	0,01707	0,00066	0,00066	0,03	0,870
<i>fz*ap</i>	1	0,09000	0,00053	0,00053	0,02	0,883
<i>fz*vc</i>	1	0,01000	0,00100	0,00100	0,04	0,840
<i>ap*vc</i>	1	0,02250	0,00225	0,00225	0,09	0,762
<i>fz*ap*vc</i>	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	1,000
Error	19	0,45297	0,45297	0,02384		
Total	26	3,50087				
S = 0,154403		R-Sq = 87,06%		R-Sq (adj) = 82,29%		

Fonte: Autoria própria.

Conforme a ANOVA para o resultado da rugosidade, o fator velocidade de corte (*vc*) não apresentou significância. Para identificar a melhor combinação dos fatores em relação a menor rugosidade, analisou os fatores avanço por dentes (*fz*) e profundidade de corte (*ap*) através do gráfico de contorno (Figura 04). Conforme o gráfico, a melhor combinação seria 0,05 para o fator *fz* e entre 1 e 1,25 para o fator *ap*. Essa combinação foi identificada no experimento número 17, conforme a tabela 4.

Figura 04 – Gráfico de contorno dos fatores fz e ap para o resultado rugosidade



Fonte: Autoria própria.

5 DISCUSSÃO

No estudo de caso, duas técnicas de análises de dados foram utilizadas e apresentaram resultados semelhantes. Para os resultados de rugosidade e força resultante nenhuma interação foi significativa. A rugosidade apresentou os fatores fz e ap significativos e o fator vc não foi significativo. Observa-se que o valor da rugosidade é alterado variando com os parâmetros de usinagem. Ghani, Choudhury e Hassan (2004), utilizaram as mesmas técnicas no estudo e apresentaram resultados semelhantes. Vale ressaltar que a rugosidade da superfície de uma peça de trabalho usinada é um dos requisitos do cliente, portanto, um parâmetro importante de análise dentro do processo.

O fator penetração de trabalho (ae) foi fixado para o experimento, não apresentando significância nos resultados. As condições ideais são definidas para os fatores significativos sobre os resultados da rugosidade e força resultante. Como a rugosidade é um dos requisitos do cliente, analisou-se a melhor combinação para a rugosidade. A melhor combinação foi identificada no experimento número 17 (tabela 4), apresentando o avanço de dente (fz) em 0,05 (mm/dente) e a profundidade de corte (ap) em 1,125 (mm). Apesar de não apresentar significância, o fator velocidade de corte (vc) estava na combinação 325 (m/min). Ghani, Choudhury e Hassan (2004), identificaram a combinação ideal para obter valor baixo da rugosidade em 0,608 (μm) para rigidez da superfície, 1334 (N) para a força resultante.

Vale ressaltar, que a melhor combinação não apresentou a menor média para o sinal-ruído da rugosidade. A menor média do S/N da rugosidade foi identificada no experimento número 6, mas apresentou a maior média para a rugosidade. Dados semelhantes foram observados no experimento apresentado por Ghani, Choudhury

e Hassan (2004). As menores médias para o sinal-ruído da força resultante e rugosidade não apresentaram as melhores combinações para obtenção para a rugosidade.

A força resultante apresentou como melhor resultado o experimento número 21, com uma força de 3501,409 N. Apesar desse resultado, o valor para a rugosidade estava entre as mais altas observadas no experimento. Sugere-se que a força de corte esteja associada com o avanço por dente e a velocidade de corte, mesmo que pela ANOVA apenas a velocidade de corte seja significativo.

6 CONSIDERAÇÕES

A partir da análise do resultado na fresagem utilizando a abordagem de relação sinal-ruído (S/N) e análise de variância (ANOVA), foi possível identificar o melhor arranjo dos fatores envolvidos. Para a rugosidade, os fatores avanço do dente e profundidade de corte foram significativos e em relação a força resultante, a velocidade de corte apresentou significância. O sinal-ruído para a rugosidade e força resultante não apresentaram nenhuma interação significativa.

Uma vez que a rugosidade é um requisito de controle da qualidade pelo cliente a melhor o experimento apresentou que a configuração para a fresagem seria o avanço de dente (fz) em 0,05 (mm/dente) e a profundidade de corte (ap) em 1,125 (mm). O fator velocidade de corte (vc) estava na combinação 325 (m/min), mas não apresentou significância. Reforçando que o efeito penetração de trabalho (ae) foi fixado no valor de 16,5 mm. A melhor combinação foi confirmada através do gráfico de contorno dos fatores fz e ap .

Conclui-se que, o experimento propicia a utilização de dois métodos estatísticos para identificação e confirmação das melhores combinações no processo de fresagem. Com isso, propicia uma redução de custo no processo industrial com a realização de testes, buscando atender os requisitos dos clientes.

REFERÊNCIAS

Almeida, H. S.; TOLEDO, J. C. Método Taguchi: Qualidade voltada para o Projeto do Produto e do Processo. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 62-68, 1989.

ANTONY, J.; PERRY, D.; WANG, C.; KUMAR, M. An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process. **Assembly Automation**, v. 26, n. 1, pp 18–24, 2006. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1108/01445150610645611>

BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; GOMES, J. H. F.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. **Precision Engineering**, v. 38, p. 628-638, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.02.013>

GHALME, S.; MANKAR, A.; BHALERAO, Y. J. **Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method.** SpringerPlus, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3055-y>

GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; HASSAN, H. H. Application of Taguchi method in the optimizations of end milling parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. Malaysia, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00865-3)

KHANNA, N.; GANDHI, A.; NAKUM, B.; SRIVASTAVA, A. **Optimization and analysis of surface roughness for INVAR-36 in end milling operations.** Materials Today: Proceedings 5. P. 5281-5288p, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.111>

MAIYAR, L. M.; RAMANUJAM, R.; VENKATESAN, K.; JERALD, J. Optimization of machining parameters for end milling of inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis. **Procedia Engineering** 64, p. 1276-1282. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.208>

MIA, M. **Mathematical modeling and optimization of MQL assisted end milling characteristics based on RSM and Taguchi method.** Measurement 121, p. 249-260, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.017>

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 7 ed. New York: John Wiley, 2009.

RAVINDRANATH, V. M.; SHANKAR, G. S. S.; BASAVARAJAPPA, S.; SURESH, R. **Optimization of Al/B₄C and Al/B₄C/Gr MMC drilling using Taguchi approach.** Materials Today: Proceedings 4, p. 11181-11187, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.085>

ROSS, P. J. **Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade.** São Paulo: Makron, 1991.

SANDVIK, C. **Manual Técnico de Usinagem.** Sandviken, 2011.

WANG, X.; DUAN, J.; JIANG, M.; ZHANG, F.; KE, S.; WU, B. Investigation of processing parameters for three-dimensional laser ablation based on Taguchi method. **Int J Adv Manuf Technol**, p. 2963-2974, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0749-4>



Artigo recebido em: 06/03/2023 e aceito para publicação em: 29/03/2023

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v22i4.4858>