



OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE FRESAGEM USANDO O MÉTODO DE TAGUCHI COM A ANÁLISE RELACIONAL DE GREY

Daniel Pereira ¹
João Ribeiro ²
Luis Queijo ³

Resumo: Na indústria, o uso das máquinas de comando numérico (CNC) tem sido muito recorrente, pois é necessário minimizar os tempos de maquinagem e obter uma elevada precisão. Um dos processos mais utilizados para maquinar materiais metálicos, como o aço e ferros fundidos, é a fresagem. Contudo, para melhorar este tipo de processo é necessário estudar a influência dos diferentes parâmetros de maquinagem e, com isso, selecionar corretamente as ferramentas de corte mais adequadas à operação de corte por arranque de aparas. Neste estudo analisou-se o efeito de quatro parâmetros do processo de fresagem (o tipo de pastilha, a velocidade de corte, o avanço e a penetração axial) na rugosidade superficial, no desgaste das pastilhas e na taxa de produção durante a maquinagem de um ferro fundido branco com uma dureza de 370 HB. Para esta análise foram utilizados dois métodos de otimização: o método de Taguchi e a análise relacional de Grey. Com o método de Taguchi foi possível determinar a matriz de ensaios experimentais (L18) e, posteriormente, determinar a melhor combinação de parâmetros para cada elemento de controlo. A análise relacional de Grey foi utilizada para determinar a combinação ótima de parâmetros para o conjunto dos elementos de controlo. Cada ensaio terminou quando as pastilhas sofreram um desgaste igual ou superior a 0.2 [mm], valor definido pela norma ISO 8688-1. No final dos 18 ensaios foi realizado um tratamento estatístico dos dados através da análise de variância (ANOVA). Com isso, verificou-se que o valor máximo de vida útil foi de 222 [min], o valor mínimo de rugosidade foi de 0.31 [μm] e o valor máximo de taxa de produção foi de 4.584 [cm³/min]. Com recurso à ANOVA foi possível determinar que o parâmetro que mais influenciou a vida útil foi o avanço com 41.32 %, enquanto para a rugosidade foi o tipo de pastilha o fator mais influente (90.85 %) e, por último, para a taxa de produção, três parâmetros que influenciam da mesma forma, a velocidade de corte, o avanço e a penetração axial com 33,33 %. Com a ajuda da análise relacional de Grey, verificou-se que a melhor combinação obtida foi: Pastilha 2, velocidade de corte 150 [m/min], avanço de 0.1 [mm/dente] e a penetração axial de 0.3 [mm].

Palavras chave : Fresagem, Parâmetros de Corte, Método de Taguchi, Análise Relacional de Grey, Análise de Variância.

¹ Instituto Politécnico de Bragança - daniel_pereira25@hotmail.com

² Instituto Politécnico de Bragança

³ Instituto Politécnico de Bragança

1. INTRODUÇÃO

O surgimento da fresadora CNC foi um marco importante na indústria, pois proporciona uma enorme flexibilidade e versatilidade. Uma das vantagens desta máquina-ferramenta com controle numérico é a possibilidade de obter produtos com uma elevada precisão, proporcionando, também, um bom acabamento superficial. Além disso, o tempo de processamento é bastante baixo em comparação com os processos de maquinagem convencionais. Isto é bastante importante para a indústria, uma vez que é essencial fabricar, a baixo custo, produtos de alta qualidade num curto espaço de tempo [1].

A eficiência dos parâmetros de maquinagem tem sido um problema enfrentado pelas indústrias, tornando-se, por isso, tema de muitos estudos. Os parâmetros de maquinagem ótimos são de grande preocupação nos ambientes fabris, pois os custos de maquinagem têm um papel fundamental na competitividade do mercado industrial. A maquinagem económica tem uma enorme importância essencialmente quando são utilizadas máquinas de controle numérico [2].

No início de um projeto os engenheiros deparam-se sempre com dois tipos de problema: O primeiro é a determinação dos valores dos parâmetros que vão gerar a qualidade do produto desejado, atendendo às especificações técnicas; o segundo problema, é a capacidade de maximizar o desempenho da produção utilizando os recursos disponíveis [3]. O processo de maquinagem e a escolha de uma ferramenta de corte proporciona várias combinações de parâmetros, como a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte. Cada combinação destes parâmetros, origina uma rugosidade da superfície maquinada e o desgaste da ferramenta de corte. No entanto, torna-se difícil decidir a melhor combinação que oferece um valor inferior de rugosidade superficial e uma maior vida da ferramenta de corte.

Sendo a qualidade da superfície maquinada, um parâmetro importantíssimo na qualidade de um produto, é necessário medir a rugosidade da superfície. Embora este parâmetro seja alcançado experimentalmente, são vários os estudos que procuram algoritmos matemáticos capazes de prever a rugosidade superficial no processo de maquinagem [3],[4]. Por serem estudos demorados e dispendiosos, torna-se quase impossível a indústria utilizá-los.

As técnicas de otimização surgiram para minimizar o número de combinações de parâmetros, para que o número de ensaios experimentais seja reduzido. Nos últimos tempos, foram desenvolvidas várias técnicas de otimização para serem aplicadas à maquinagem [5]. Entre elas, as mais utilizadas são a lógica de fuzzy [6], o método de Taguchi [7],[8], os algoritmos genéticos [9], a Análise Relacional Grey [10], [11] e o método de resposta de superfície [12], [13]. No trabalho descrito neste relatório foi usada a técnica de Taguchi e a análise relacional Grey para otimizar a superfície maquinada e estudar a vida útil das ferramentas de corte.

O método de Taguchi [14] possibilita a definição de matrizes ortogonais de experiências cuja combinação entre diferentes parâmetros permite a determinação da combinação ótima para um determinado fator de controle, exemplo a rugosidade [15]. Este método está, normalmente, associado a ferramentas estatísticas, como a análise de variância (ANOVA) que permite modelar alguma incerteza dos resultados experimentais do modo a estimar resultados futuros.

Na análise relacional Grey os parâmetros são avaliados de 0 a 1 perante a sua importância, possibilitando assim, a descoberta da melhor combinação de parâmetros. Esta ferramenta tem sido muito usada nos últimos anos, combinada com o Método de Taguchi [16].

2. DESENHO DAS EXPERIÊNCIAS E PROCESSO

Com o intuito de reduzir o tempo experimental foi utilizada uma matriz ortogonal L18 de Taguchi. Esta permite estudar os efeitos dos parâmetros de fresagem através de uma série de combinações de experiências. O desenho dessas experiências é visível na tabela (1), mostrando

dois níveis para o primeiro parâmetro e três níveis para a velocidade de corte, o avanço e a penetração axial, como é visível na tabela 2.

Tabela 1-Desenho das experiências (matriz ortogonal)

Número de ensaio	Pastilha	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/tooth]	Penetração axial [mm]
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tabela 2-Valores dos diferentes níveis para os diferentes parâmetros.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Pastilha	1	1	
Velocidade de corte (m/min)	50	100	150
Avanço (mm/tooth)	0.1	0.2	0.3
Penetração axial (mm)	0.1	0.2	0.3

Os ensaios experimentais foram efetuados numa operação de fresagem de uma peça em forma de paralelepípedo. Sendo as dimensões iniciais da peça, 180 [mm] de comprimento, 65 [mm] de largura e 65 [mm] de altura. Essa peça era de ferro fundido branco e possui-a uma dureza de 370 HB (Brinell).

Para maquinar este material foi utilizado um centro de maquinagem vertical, Deckel Maho DMC 63 V. Para isso foram utilizadas duas ferramentas de corte de fabricantes diferentes, como se encontra indicado na matriz ortogonal.

No presente estudo, para medir a rugosidade superfície foi necessário recorrer a um rugosímetro, Mitutoyo SJ-301. A medição de rugosidade foi repetida três vezes em duas regiões distintas, como é possível verificar na figura 1. No final é considerado um valor médio das medições

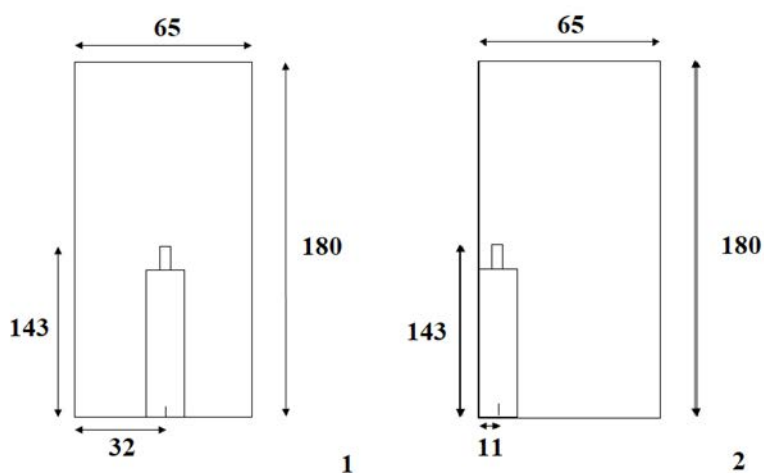


Figura 1-Medição da rugosidade superficial nos dois pontos diferentes.

O tempo de maquinagem foi registado com um cronómetro, esse tempo é apenas de uma passagem na face do bloco. O tempo de vida útil da ferramenta é calculado multiplicando o número de vezes que a fresa passa na face, as camadas que são retiradas e o tempo de cada passagem. O tempo de cada passagem foi registado duas vezes.

3 Resultados Obtidos

Na tabela 3 estão representados os valores obtidos nos ensaios experimentais. O valor da rugosidade corresponde à média das medições nas duas posições (figura 1).

Analisando a tabela 3, é possível verificar que é no ensaio 16 que ocorre a menor rugosidade

superficial média (Ra), com o valor de 0.31 [μm]. Enquanto para a vida útil das ferramentas, é máxima no ensaio 10, tendo sido alcançado um valor de com 222 [min]. Por fim, para a taxa de produção verifica-se que existem três ensaios com o valor máximo, 4.584 [cm^3/min].

Tabela 3-Valores obtidos nos ensaios experimentais para a rugosidade superficial, vida útil e taxa de produção.

Número de ensaio	Pastilha	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/tooth]	Penetração axial [mm]	Vida útil das pastilhas [min]	Média da rugosidade [μm]	Tp [cm^3/min]
1	1	50	0.1	0.1	163	2,15	0,255
2	1	50	0.2	0.2	8	3,08	1,019
3	1	50	0.3	0.3	5	2,26	2,292
4	1	100	0.1	0.1	64	1,95	0,509
5	1	100	0.2	0.2	3	1,85	2,037
6	1	100	0.3	0.3	2	2,22	4,584
7	1	150	0.1	0.2	7	2,24	1,528
8	1	150	0.2	0.3	2	1,76	4,584
9	1	150	0.3	0.1	1	1,97	2,292
10	2	50	0.1	0.3	222	0,57	0,764
11	2	50	0.2	0.1	55	0,59	0,509
12	2	50	0.3	0.2	15	0,77	1,528
13	2	100	0.1	0.2	48	0,5	1,019
14	2	100	0.2	0.3	55	0,6	3,056
15	2	100	0.3	0.1	75	0,8	1,528
16	2	150	0.1	0.3	135	0,31	2,292
17	2	150	0.2	0.1	5	0,44	1,528
18	2	150	0.3	0.2	1	0,46	4,584

4 Análise e discussão de Resultados

Nos processos de fabrico por arranque de apara, idealmente, o objetivo será conseguir uma rugosidade superficial baixa, uma vida útil das ferramentas de corte longa com uma elevada taxa de produção. A razão sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade estudada (rugosidade, vida útil da ferramenta e taxa de produção) de uma maneira controlada relativamente aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Para isso, do ponto de vista da qualidade, existem três categorias típicas de características de qualidade, dependendo do objetivo pretendido e que são “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor”. Assim, de acordo os nossos objetivos, pretende-se minimizar a rugosidade, maximizar a vida útil da ferramenta e a taxa de produção.

Um dos objetivos da maquinagem é conseguir uma rugosidade superficial o mais reduzida possível, por isso a razão S/N para este parâmetro é “quanto menor melhor”. Por isso é utilizada a Equação 1, onde em que Y_i são os dados observados e o símbolo n representa o número de observações.

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Equação (1)}$$

Para a vida útil das ferramentas e para a taxa de produção, o que importa é “quanto maior melhor” por isso é usada a Equação 2:

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Tabela 4-Valores da razão Sinal-Ruído obtidos nos ensaios experimentais.

Número de ensaio	S/NL Vida Útil [dB]	S/NS Rugosidade Superficial [dB]	S/NS Rugosidade Superficial [dB]
1	44,244	-6,8374	-6,8374
2	18,062	-9,9029	-9,9029
3	13,979	-7,6087	-7,6087
4	36,124	-6,0303	-6,0303
5	9,542	-5,3519	-5,3519
6	6,021	-6,9383	-6,9383
7	16,902	-6,8684	-6,8684
8	6,021	-4,9647	-4,9647
9	0,000	-5,9198	-5,9198
10	46,927	4,8008	4,8008
11	34,807	5,8856	5,8856
12	23,522	1,8973	1,8973
13	33,625	5,5880	5,5880
14	34,807	3,9903	3,9903
15	37,501	1,8037	1,8037
16	42,607	9,4583	9,4583
17	13,979	6,5357	6,5357
18	0,000	6,8076	6,8076

4.1 Análise Relacional de Grey para a razão S/N

Para realizar a Análise Relacional de Grey é necessário recorrer aos valores da razão S/N obtidos através do método de Taguchi, como é possível verificar na Tabela 4. De seguida é necessário normalizar os valores da razão sinal-ruído da Tabela 4, para isso recorre-se à equação 3 obtendo assim a Tabela 5.

$$x_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij}\eta_{ij} - \min_{ij}\eta_{ij}} \quad \text{Equação (3)}$$

Tabela 5-Valores da razão S/N normalizados para a análise relacional de Grey.

	S/N Vida Útil	S/N Rugosidade	S/N Taxa de Produção
Sequência Ideal	1	1	1
1	0,9428	0,1583	0,0000
2	0,3849	0,0000	0,4796
3	0,2979	0,1185	0,7602
4	0,7698	0,2000	0,2398
5	0,2033	0,2351	0,7194
6	0,1283	0,1531	1,0000
7	0,3602	0,1567	0,6199
8	0,1283	0,2551	1,0000
9	0,0000	0,2057	0,7602
10	1,0000	0,7594	0,3801
11	0,7417	0,8155	0,2398
12	0,5012	0,6095	0,6199
13	0,7165	0,8001	0,4796
14	0,7417	0,7176	0,8597
15	0,7991	0,6046	0,6199
16	0,9079	1,0000	0,7602
17	0,2979	0,8490	0,6199
18	0,0000	0,8631	1,0000

Depois da Tabela 5, já é possível calcular o coeficiente relacional de Grey com a utilização da equação 4. Nesta mesma equação a característica ζ varia de 0 a 1, sendo que para este projeto o valor utilizado para os três casos (vida útil, rugosidade e taxa de produção) foi de 0,5.

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad \text{Equação (4)}$$

Tabela 6- Coeficiente relacional de Grey.

Ensaio	S/N Vida Útil	S/N Rugosidade	S/N Taxa de Produção
1	0,8974	0,3727	0,3333
2	0,4484	0,3333	0,4900
3	0,4159	0,3619	0,6758
4	0,6847	0,3846	0,3968
5	0,3856	0,3953	0,6406
6	0,3645	0,3712	1,0000
7	0,4387	0,3722	0,5681
8	0,3645	0,4016	1,0000
9	0,3333	0,3863	0,6758
10	1,0000	0,6752	0,4465
11	0,6594	0,7304	0,3968
12	0,5006	0,5615	0,5681
13	0,6382	0,7144	0,4900
14	0,6594	0,6390	0,7809
15	0,7134	0,5584	0,5681
16	0,8445	1,0000	0,6758
17	0,4159	0,7681	0,5681
18	0,3333	0,7850	1,0000

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_i \xi_{ij}(i)$$

Equação (5)

Por fim, com a Tabela 6 e com a equação 5 é possível chegar ao grau relacional de Grey, como é possível verificar na Tabela 7.

Tabela 7-Grau relacional de Grey e respetiva ordem.

Ensaio	Grau Relacional de Grey	Ordem
1	0,53446	12
2	0,42391	18
3	0,48457	14
4	0,48870	13
5	0,47382	15
6	0,57858	10
7	0,45967	17
8	0,58871	8
9	0,46517	16
10	0,70721	2
11	0,59553	7
12	0,54340	11
13	0,61420	5
14	0,69312	4
15	0,61332	6
16	0,84012	1
17	0,58405	9
18	0,70612	3

Posto isto, é possível chegar à tabela 8 que contém a media do grau relacional de Grey para cada nível. Para além disso a tabela também contém a média total. Com estes valores é possível chegar à melhor combinação, lembrando que quanto maior for o valor do grau relacional de Grey melhor.

Tabela 8-Resposta para o grau relacional de Grey.

Grau relacional de Grey

Símbolo	Parâmetros	Nivel1	Nivel2	Nivel3	Max-min	Média Total
A	Pastilhas	0,4997	0,6552		0,1512	
B	Vc	0,5482	0,5770	0,6073	0,0591	
C	fz	0,6074	0,5599	0,5652	0,0475	0.5775
D	ap	0,5469	0,5369	0,6487	0,1119	

Na tabela 8 é possível verificar que a melhor combinação é A2B3C1D3, onde A2 representa a Pastilha 2, B3 a Vc = 150 m/min, C1 a fz=0,1 mm/t e D3 é a penetração axial de 0,3 mm.

4.2 Anova

O objetivo da análise de variância é determinar quais os parâmetros analisados neste projeto é que afetam mais significativamente a vida útil das pastilhas, a rugosidade superficial e a taxa de produção [7]. Para isso foram utilizados os valores dos parâmetros nos diferentes níveis e os valores da tabela 7

Na tabela 9, o Df representa os graus de liberdade, Sq a soma dos quadrados, Md a média dos quadrados e o Valor F é uma ferramenta estatística para verificar quais são os parâmetros com maior influência na característica da qualidade. O Md é obtido pela divisão do Sq pelo Df.

Tabela 9- Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey.

Grupo	Df	Sq	Md	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Pastilha	1	0,1088	0,1088	42,18	0	54,62%
Vc	2	0,0105	0,0052	2,03	0,182	5,27%
fz	2	0,0081	0,0041	1,58	0,254	4,09%
ap	2	0,0460	0,0230	8,91	0,003	23,08%
Erro	10	0,0258	0,0026			12,95%
Total	17	0,1992				100,00%

4.3 Confirmação dos resultados

Depois de selecionar o nível ideal dos parâmetros, a última etapa é validar esses mesmos valores para verificar a melhoria no processo de fresagem. Para isso é necessário calcular a razão S/N estimada ($\hat{\eta}$) usando o nível ideal dos parâmetros do projeto, com o recurso à

equação 6 [17].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{t=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

η_m – Média total da razão S/N;

$\bar{\eta}_i$ – Razão S/N média para o nível ótimo;

q – Número dos principais parâmetros que influenciam.

Sendo a melhor combinação A2B3C1D3 e com a utilização da equação 6 já é possível calcular a razão S/N estimada.

$$\hat{\eta} = 0,5775 + (0,6552 - 0,5775) + (0,6073 - 0,5775) + (0,6074 - 0,5775) + (0,6487 - 0,5775) = 0,7861$$

Tabela 10- Comparação entre os valores do processo inicial e final.

Fatores de corte ótimos			
	Fatores de corte iniciais	Prognóstico	Experiência
Combinação	A2B3C3D2	A2B3C1D3	A2B3C1D3
Vida Útil [m]	1		135
Rugosidade [μm]	0,46		0,31
Taxa de Produção [cm³/min]	4,584		2,292
Grau relacional de Grey	0,70612	0,7861	0,84012

A tabela 10 apresenta a comparação entre os parâmetros de fresagem inicial e a combinação de parâmetros ideal. É notável que a utilização da combinação de parâmetros de fresagem ideal aumenta o grau relacional de Grey em, aproximadamente, 19 %.

5 CONCLUSÕES

O uso do método de Taguchi e a análise relacional de Grey prova que é possível otimizar os parâmetros no processo de fresagem. A otimização obtida com os dois métodos é diferente, pois para o método de Taguchi é possível achar, individualmente, qual a melhor combinação para a vida útil da ferramenta, ou para a rugosidade superficial, ou para a taxa de produção. No caso da análise relacional de Grey é possível obter o ensaio que combine os melhores resultados para o conjunto dos fatores: a vida útil das ferramentas, rugosidade superficial e taxa

de produção.

Com a análise relacional de Grey foi possível chegar à combinação que suporta o melhor balanço da vida útil, rugosidade superficial e taxa de produção. Essa combinação foi A2B3C1D3, ou seja, pastilha 2 velocidade de corte 150 [m/min], avanço de 0,1 [mm/t] e penetração axial de 0,3 [mm]. Feita a análise de variância (ANOVA) para este método, concluiu-se que o parâmetro que mais influenciava era a escolha da pastilha com 54,62 % seguido da penetração axial com 23,08 %.

Comparando os dois métodos, o método de Taguchi é uma ferramenta muito poderosa, mas para este estudo, contudo, está muito direcionado para a otimização de um único fator de controlo. Em contrapartida, a análise relacional de Grey permite otimizar, através um balanceamento, vários fatores de controlo, neste caso foi a rugosidade superficial, a vida útil da ferramenta e a taxa de produção.

OPTIMIZATION OF MILLING PARAMETERS USING THE TA-GUCHI METHOD WITH GRAY'S RELATIONAL ANALYSIS

Abstract: In the industry the use of numerical control (CNC) machines has been very recurrent, as it is necessary to minimize the machining times and obtain high precision. One of the most used processes for machining metallic materials, such as steel and cast iron, is milling. However, in order to improve this type of process, it is necessary to study the influence of the different parameters and thus correctly choose the cutting tools most appropriate to the machining operation. In this study, the effect of four parameters of the milling process (type of insert, cutting speed, feed rate and axial penetration) on the surface roughness, the wear of the pellets and the production rate during the machining of one cast iron (hardness 370 HB). Two optimization methods were used: Taguchi's method and Gray's relational analysis. With the Taguchi method, it was possible to determine the experimental test matrix (L18) and later to discover the best combination of parameters for each control element (roughness, chip wear and rate of production). Gray's relational analysis was used to determine the optimum combination of parameters for the set of control elements. Each test was terminated when the pads suffered wear equal to or greater than 0.2 [mm]. At the end of the 18 trials a statistical treatment of the data was performed through analysis of variance (ANOVA). Thus, the maximum lifetime value was 222 [min], the minimum roughness value was 0.31 [μm] and the maximum value of production rate was 4.584 [cm^3 / min]. Using ANOVA, it was possible - it was verified that the parameter that most influenced the useful life was the advance with 41.32%, while for the roughness was the type of pellets with 90.85% and finally, for the production rate, three parameters that influence in the same way, the cutting speed, the feed rate and the axial penetration with 33.33%. With the help of Gray's relational analysis, the best combination obtained was: Table 2, shear rate 150 [m / min], feed rate of 0.1 [mm / tooth] and axial penetration of 0.3 [mm].

Keywords: Milling, Cutting Parameters, Taguchi Method, Gray Relational Analysis, Variance Analysis.

Originais recebidos em: 18/11/2017
Aceito para publicação em: 22/04/2018

REFERENCIAS

- [1] P. Maurya, P. Sharma, and B. Diwaker, "Implementation of Taguchi methodology to Optimization of CNC end milling process parameters of AL6351 – T6," vol. 2, pp. 3530–3533, 2012.
- [2] M. Tolouei-Rad and I. . Bidhendi, "On the optimization of machining parameters for milling operations," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–16, 1997.
- [3] P. G. Benardos and G. C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: A review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [4] P. V. S. Suresh, P. V. Rao, and S. G. Deshmukh, "A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model," vol. 42, no. January, pp. 675–680, 2002.
- [5] A. Aggarwal and H. Singh, "Optimization of machining techniques — A retrospective and literature review," *Sadhana*, vol. 30, no. 6, pp. 699–711, 2005.
- [6] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, and K. Palanikumar, "Fuzzy Modeling and Analysis of Machining Parameters in Machining Titanium Alloy," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 23, no. 4, pp. 439–447, 2008.
- [7] W. H. Yang and Y. S. Tarng, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [8] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, "Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007.
- [9] P. Palanisamy, I. Rajendran, and S. Shanmugasundaram, "Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 32, no. 7–8, pp. 644–655, 2007.
- [10] P. C. Mishra, D. K. Das, M. Ukamanal, B. C. Routara, and A. K. Sahoo, "Multi-response optimization of process parameters using Taguchi method and grey relational analysis during turning AA 7075/SiC composite in dry and spray cooling environments," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 6, pp. 445–456, 2015.
- [11] L. B. Abhang and M. Hameedullah, "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 1–4, pp. 13–24, 2012.
- [12] H. Öktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran, "Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 11–16, 2005.
- [13] S. Neşeli, S. Yaldiz, and E. Türkeş, "Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 3, pp. 580–587, 2011.
- [14] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering*, 2aEdição. McGraw-Hill, 1996.
- [15] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, "Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 30–35, 2017.
- [16] H. S. Lu, C. K. Chang, N. C. Hwang, and C. T. Chung, "Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 8, pp. 3808–3817, 2009.
- [17] Y. F. Hsiao, Y. S. Tarng, and W. J. Huang, "Optimization of Plasma Arc Welding Parameters by Using the Taguchi Method with the Grey Relational Analysis," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 23, no. 1, pp. 51–58, 2007.