

ANÁLISE DO ACABAMENTO DE PEÇAS COM GEOMETRIAS COMPLEXAS USANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Kathlen Lopes Fazzion, kathlen.fazzion@hotmail.com¹
Jéssica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹
Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹
Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹

¹Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG

Resumo: Uma das áreas da manufatura moderna que apresenta um alto nível de exigência e complexidade é a fabricação de moldes metálicos. Deve-se ressaltar que praticamente todos os bens de consumo, principalmente os da linha branca, apresentam partes plásticas que são fabricadas a partir da injeção de moldes ou a estampagem em matrizes metálicas. Portanto, o processo de fresamento torna-se primordial para a fabricação de matrizes com geometrias complexas. O objetivo deste trabalho foi o estudo do desvio dimensional de moldes com superfícies complexas fabricadas por fresamento com ferramentas de ponta esférica no aço AISI H13. Foi utilizada a técnica de metodologia de superfície de respostas para o planejamento dos experimentos e modelagem do desvio dimensional. Foram realizados dois planejamentos para três fatores, um para uma superfície convexa e outro para uma superfície côncava, onde os parâmetros variados foram a velocidade de corte, o avanço por dente e a profundidade radial de corte. Os resultados demonstraram que para as peças de superfície convexa, os fatores significativos em comum para a rugosidade foram o avanço por dente, a profundidade lateral de corte e a interação entre estes dois parâmetros. Por outro lado, para as peças de superfície côncava, também para a rugosidade, o fator significativo foi apenas o avanço por dente, não havendo interações significativas.

Palavras-chave: Fresamento, Moldes e Matrizes, Metodologia de Superfície de Resposta, Rugosidade Ra, Rugosidade Rz.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por moldes e matrizes dentro de diversos campos da indústria, a necessidade de uma usinagem que proporcione uma maior qualidade, baixo custo e lead time reduzido, vem aumentando. Assim, a busca por uma maior competitividade pelas organizações ocasionou grandes avanços tecnológicos na área e fez com que o processo de usinagem de materiais endurecidos se tornasse de grande importância para o mercado.

Segundo Caruso et al. (2010), o interesse na usinagem de peças endurecidas vem crescendo na indústria de fabricação nos últimos anos por possuir a capacidade de alcançar acabamentos de alta qualidade, o que evita o uso da retificação e aumenta a eficiência do processo.

A usinagem de matrizes e moldes endurecidos proporciona muitas vantagens, tanto no processo como no resultado final pois, além de ser mais barata e rápida do que os métodos tradicionais, proporciona ganho em qualidade e controle dimensional (NICOLA, 2007).

Desse modo, o fresamento se tornou um processo de fabricação bastante viável em relação ao custo-benefício para a fabricação das peças supramencionadas. Igualmente, por apresentar uma alta resistência ao desgaste e às altas temperaturas, o aço AISI H13 vem sendo amplamente utilizado.

Diversas geometrias de ferramentas são empregadas na produção de matrizes e moldes para atender as suas características de forma. Uma das mais utilizadas é a fresa de ponta esférica, por melhorar o ponto de contato e permitir a usinagem em regiões específicas com geometrias complexas (ARRUDA et al., 2012).

Este tipo de ferramenta vem sendo muito estudado para que se possa entender não apenas o fenômeno de corte, mas para otimizar o acabamento e os tempos de produção. Boujelbene et al. (2007) estudou a influência da orientação da ferramenta e a variação efetiva da velocidade de corte de fresas de ponta esféricas no acabamento superficial de moldes. Segundo o autor, a desvantagem das máquinas ferramentas de três eixos está relacionada com as baixas gamas de velocidade de corte disponíveis nestes equipamentos, comprometendo a qualidade superficial. O trabalho do autor

demonstrou que máquinas de cinco eixos proporcionam melhor acabamento das superfícies, melhor topografia das formas complexas e baixos tempos de polimento.

Diante da necessidade da indústria de se possuir um bom controle de qualidade, o medidor de coordenadas surgiu como uma importante ferramenta para o teste das tolerâncias geométrica e dimensional dos produtos fabricados.

Segundo Cappetti et al. (2016), do ponto de vista da metrologia, o medidor de coordenadas representa o instrumento universal de medição porque abrange todos os possíveis controles dimensionais e geométricos, o que evita o uso de vários instrumentos que podem levar a falta de uniformidade na incerteza para as várias medições.

Existem vários tipos de medidores de coordenadas atualmente, porém, comparados a medição laser, os medidores por contato apresentam maior confiabilidade e precisão. O processo de medição por contato consiste na coleta de vários pontos que são transformados em conjuntos de coordenadas. Então, esses pontos são estruturados a partir das coordenadas por um software que determina a geometria dimensional e tolerâncias da peça medida.

O acabamento da superfície e o desvio dimensional são duas características muito importantes na usinagem dos metais, já que garantem a sua qualidade e confiabilidade. Machado e da Silva (2004), afirmam que para se conseguir uma boa precisão dimensional é de grande importância a utilização de máquinas-ferramenta potentes, precisas e rígidas; sistemas de fixação da ferramenta e da peça adequados e rígidos, que a peça apresente uma boa qualidade, sem defeitos de fundição ou de processamento e que a ferramenta seja feita de um material adequado e tenha precisão dimensional.

A redução do desvio dimensional e o aumento da qualidade superficial do produto é um objetivo crucial da engenharia tanto no design quanto nos estágios da fabricação. Infelizmente, a redução do desvio para processos de usinagem é um problema desafiador.

Assim, a fim de descrever mais precisamente o desvio dimensional e a qualidade superficial causado pela usinagem, foram utilizados métodos como a metodologia de superfície de resposta para a modelagem do desvio dimensional e da rugosidade de peças fresadas com geometria complexas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Procedimentos Experimentais

O experimento foi realizado no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ. Os testes foram realizados em um centro de fresamento ROMI Discovery 560 de três eixos, com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 10.000 rpm e potência máxima na árvore de 12,5 kW.

Foram fabricados corpos de prova em aço H13, com dureza média de 42 HRC, com as dimensões de 40 x 40 x 25 milímetros e com as geometrias côncavas e convexas como ilustram as Fig. 1 e Fig. 2.

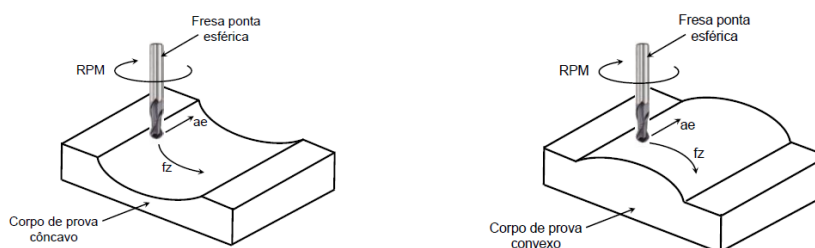


Figura 1. Esquema básico dos modelos dos corpos de prova que foram empregados nos testes experimentais (Fonte: autoria própria).



Figura 2. Corpos de prova nos testes experimentais (Fonte: autoria própria).

A ferramenta utilizada para a realização dos experimentos foi uma fresa de ponta esférica (Ball Nose), com diâmetro de 6 mm. Os parâmetros de corte foram definidos de acordo com o catálogo do fabricante da ferramenta, sendo estes recomendados para a usinagem do aço AISI H13. Dessa forma, foram variados os seguintes parâmetros de

entrada; velocidade de corte com dois níveis, avanço por dente com dois níveis e profundidade radial de corte com dois níveis. A Tabela 1 mostra os níveis e os respectivos valores que foram empregados nos testes experimentais.

Tabela 1. Planejamento dos experimentos (Fonte: autoria própria).

Parâmetros de entrada	Níveis de entrada	
	-1	+1
Velocidade de corte - V_c - [m/min]	82	118
Avanço por dente - f_z - [mm/rev]	0,03	0,08
Profundidade radial de corte - a_e - [mm]	0,05	0,1

A rugosidade foi medida com o medidor de perfil Surf Taylor 131 da empresa Taylor Robson, conforme Fig. 3 abaixo e foi modelada utilizando-se das técnicas metodologia de superfície de resposta (Response Surface Methodology - RSM).

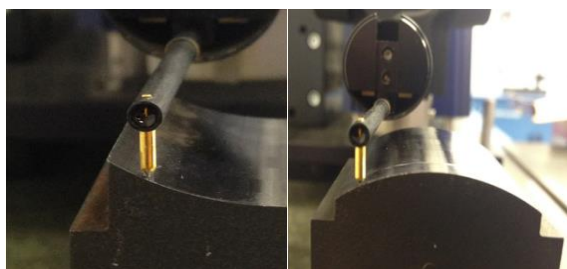


Figura 3. Medições de rugosidade no medidor de perfil Surf Taylor 131 (Fonte: autoria própria).

Segundo Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2009), a metodologia de superfície de resposta é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para o desenvolvimento, melhora e otimização de uma resposta de interesse influenciada por várias variáveis em um processo de medição e análise experimental. De acordo com Cecon e da Silva (2011), a relação entre uma resposta (y) em função de diversas variáveis pode ser descrita conforme a Eq. (1):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

Onde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são parâmetros desconhecidos e ε o erro aleatório. Assim, se a média de ε é zero, a verdadeira resposta média é dada pela Eq. (2):

$$\eta = E(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (2)$$

A superfície de resposta apresenta duas funções de aproximação: o modelo de regressão polinomial e o modelo de segunda ordem, onde o primeiro representa o efeito linear e o segundo o efeito de curvatura através da combinação do efeito linear, quadrático e de interação (BUENOS et al., 2010).

Foram utilizados para o desenvolvimento deste estudo o planejamento composto central rotacionável (Central Composite Design – CCD). O experimento de compostos centrais é o arranjo mais utilizado por ser bastante efetivo na minimização do número experimentos necessários para o desenvolvimento do modelo, avaliando o efeito de várias variáveis e procurando pelas respostas otimizadas (SON et al., 2015).

O arranjo CCD é dividido em três formas diferentes: os pontos fatoriais ou cúbicos, os pontos axiais ou estrela e os pontos centrais. Os pontos centrais representam a união dos pontos fatoriais com os pontos axiais com a adição de réplicas nos pontos centrais, junção necessária para a análise da curvatura da superfície de resposta. Por esse motivo, foi empregado para a realização do planejamento dos experimentos deste presente trabalho.

Os resultados foram modelados em duas etapas. A primeira para os corpos de prova de superfície convexa e a segunda para os corpos de prova de superfície côncava. Foram analisados os parâmetros variados que foram mais significativos na influência da qualidade superficial dessas peças.

2.2. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos experimentos considerando os fatores de controle V_c , f_z e a_e , e as respostas R_a e R_z , para o planejamento CCD das peças de superfície convexa.

Tabela 2. Planejamento experimental e resultados das peças de superfície convexa (Fonte: autoria própria).

Sequência padrão	Velocidade de corte V_c [m/min]	Avaço por dente f_z [mm/rot]	Prof. lateral de corte a_e [mm]	Rugosidade R_a [μ m]	Rugosidade R_z [μ m]
1	82	0,03	0,05	0,596433	2,9999
2	118	0,03	0,05	0,671967	3,498667
3	82	0,08	0,05	0,574433	3,0395
4	118	0,08	0,05	0,665467	3,472533
5	82	0,03	0,1	0,714233	3,736767
6	118	0,03	0,1	0,622567	3,557433
7	82	0,08	0,1	0,8991	4,6265
8	118	0,08	0,1	0,998767	4,9102
9	69,72773	0,055	0,075	0,6893	3,734533
10	130,2723	0,055	0,075	0,6441	4,251367
11	100	0,012955	0,075	0,5475	2,8353
12	100	0,097045	0,075	0,633267	3,913767
13	100	0,055	0,032955	0,5032	2,853433
14	100	0,055	0,117045	0,881933	4,467467
15	100	0,055	0,075	0,872533	4,2054
16	100	0,055	0,075	0,487033	3,068267
17	100	0,055	0,075	0,719633	3,857933
18	100	0,055	0,075	0,795	3,8306
19	100	0,055	0,075	0,834767	4,195267
20	100	0,055	0,075	0,570467	3,011833

A Tabela 3 apresenta a ANOVA para a resposta R_a das peças de superfície convexa. Inicialmente, pelos valores obtidos para os coeficientes de determinação, pode-se constatar que 100% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, segundo R^2_{adj} , e o modelo apresenta capacidade de previsão de novas observações de 99,15%, conforme R^2_{pred} . Pode-se concluir pela ANOVA que os fatores estatisticamente significativos são f_z e a_e , bem como a interação f_z*a_e , uma vez que o P-valor foi menor que o valor de alfa, considerando o nível de significância adotado $\alpha = 0,05$.

Tabela 3. ANOVA para R_a , superfície convexa (Fonte: autoria própria).

Fonte	Graus de liberdade	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	9	9014848	1001650	832592,8	0
Linear	3	79	26	21,97	0
Vc	1	1	1	0,84	0,38
Fz	1	20	20	16,62	0,002
Ae	1	66	66	54,89	0
Quadrático	3	13	4	3,55	0,056
Vc*Vc	1	0	0	0,14	0,721
fz*fz	1	13	13	10,61	0,009
ae*ae	1	0	0	0,14	0,719
Interação de dois fatores	3	36	12	9,96	0,002
Vc*fz	1	5	5	4,52	0,059
Vc*ae	1	7	7	5,67	0,038
fz*ae	1	33	33	27,6	0
Erro	10	12	1		
Lack-of-Fit	5	7	1	1,53	0,327
Erro simples	5	5	1		

Total	19	90148	60
Soma	R ²	R ² (adjunto)	R ² (predito)
1,09684	100,00%	100,00%	99,15%

A Figura 4 apresenta o gráfico dos efeitos principais de interação que foram significativos para Ra.

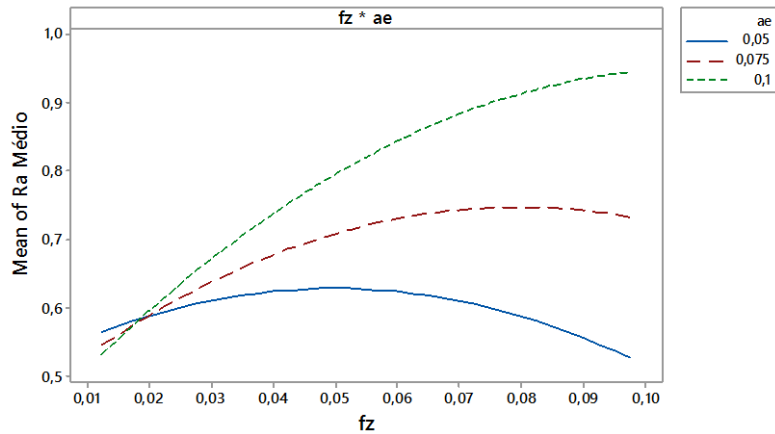


Figura 4. Gráfico de interação para Ra, superfície convexa (Fonte: autoria própria).

O modelo de regressão linear com interação para Ra nas peças de superfície convexa foi descrito conforme a Eq. (3):

$$Ra = 0,322 + 0,00416 Vc - 6,94 fz + 3,77 ae - 0,000010 Vc*Vc - 45,1 fz*fz + 5,2 ae*ae + 0,0616 Vc*fz - 0,0652 Vc*ae + 106,1 fz*ae \quad (3)$$

A Figura 5 apresenta o gráfico de superfície de resposta para Ra, considerando apenas a interação que foi significativa, que foi entre fz e ae.

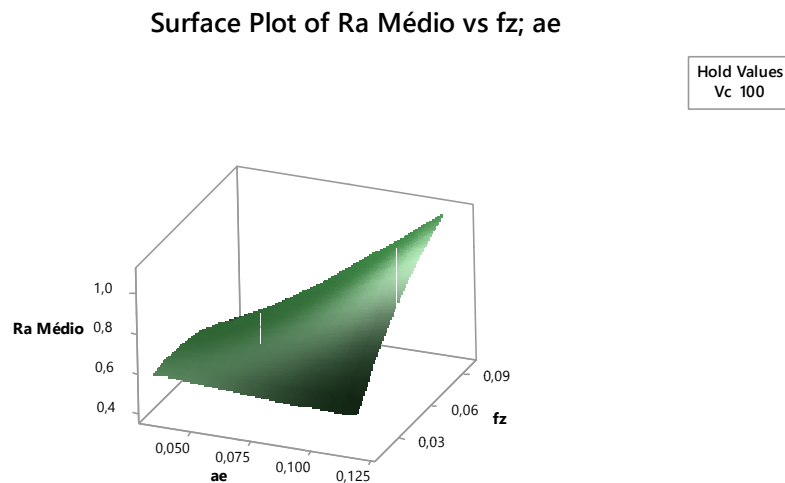


Figura 5. Gráfico de Superfície de Resposta da interação significativa em Ra, superfície convexa (Fonte: autoria própria).

A Tabela 4 apresenta a ANOVA para a resposta Rz das peças de superfície convexa. Inicialmente, pelos valores obtidos para os coeficientes de determinação, pode-se constatar que 99,69% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, segundo R²adj, e o modelo apresenta capacidade de previsão de novas observações de 99,42%, conforme R²pred. Pode-se concluir pela ANOVA que os fatores estatisticamente significativos são Vc, fz e ae, bem como a interação Vc*ae e a interação fz*ae, uma vez que o p-valor foi menor que o valor de alfa, considerando o nível de significância adotado $\alpha = 0,05$.

Tabela 4. ANOVA para Rz, superfície convexa (Fonte: autoria própria).

Fonte	Graus de	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
-------	----------	--------	--------	---------	---------

liberdade					
Modelo	9	7128,33	792,04	675,51	0
Linear	3	2921,17	973,72	830,47	0
Vc	1	131,54	131,54	112,19	0
Fz	1	478,75	478,75	408,31	0
Ae	1	1733,54	1733,54	1478,49	0
Quadrático	3	302,22	100,74	85,92	0
Vc*Vc	1	3,82	3,82	3,26	0,101
fz*fz	1	18,8	18,8	16,03	0,003
ae*ae	1	2,32	2,32	1,98	0,19
Interação de dois fatores	3	260,37	86,79	74,02	0
Vc*fz	1	5,42	5,42	4,62	0,057
Vc*ae	1	14,9	14,9	12,71	0,005
fz*ae	1	168,86	168,86	144,01	0
Erro	10	11,73	1,17		
Lack-of-Fit	5	7,7	1,54	1,91	0,247
Erro simples	5	4,02	0,8		
Total	19	7140,05			
Soma	R ²	R ² (adjunto)	R ² (predito)		
1,08282	99,84%	99,69%	99,42%		

A Figura 6 apresenta os gráficos dos efeitos principais de interação que foram significativos para Rz.

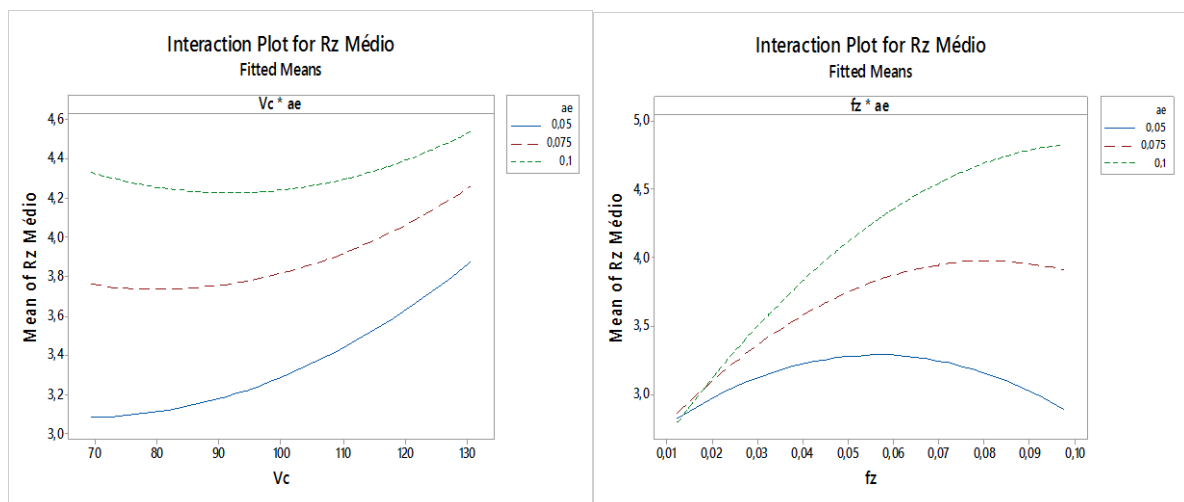


Figura 6. Gráficos de interação para Rz, superfície convexa (Fonte: autoria própria).

O modelo de regressão linear com interação para Rz nas peças de superfície convexa foi descrito conforme a Eq. (4):

$$Rz = 2,87 - 0,0253 Vc - 7,59 fz + 25,3 ae + 0,000208 Vc*Vc - 238,2 fz*fz - 83,9 ae*ae + 0,1140 Vc*fz - 0,1912 Vc*ae + 463,7 fz*ae \quad (4)$$

A Figura 7 apresenta os gráficos de superfície de resposta das interações que foram significativas para Rz.

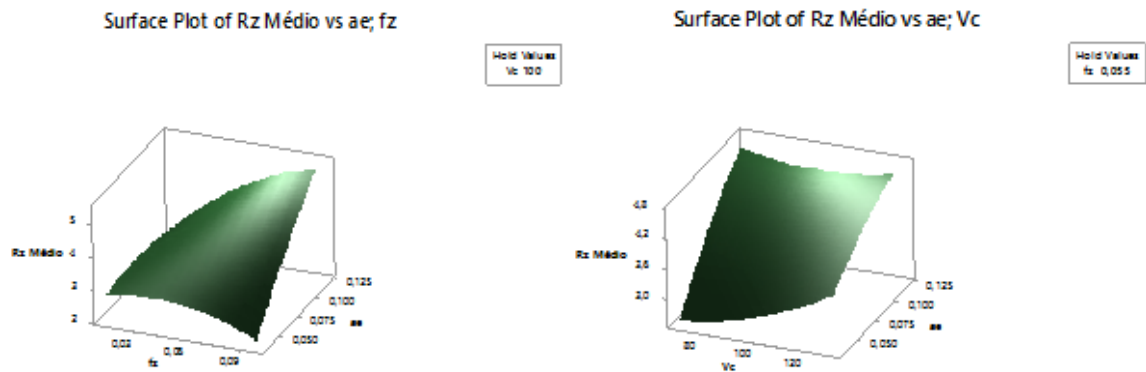


Figura 7. Gráficos de Superfície de Resposta das interações significativas em Rz, superfície convexa (Fonte: autoria própria).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos experimentos considerando os fatores de controle Vc, fz e ae, e as respostas Ra e Rz, para o planejamento CCD das peças de superfície côncava.

Tabela 5. Planejamento experimental e resultados das peças de superfície côncava (Fonte: autoria própria).

Sequência padrão	Velocidade de corte Vc [m/min]	Avanço por dente fz [mm/rot]	Prof. lateral de corte ae [mm]	Rugosidade Ra [μm]	Rugosidade Rz [μm]
1	82	0,03	0,05	0,5869	3,156333
2	118	0,03	0,05	0,5418	2,914967
3	82	0,08	0,05	0,7908	4,525333
4	118	0,08	0,05	0,737767	4,862733
5	82	0,03	0,1	0,855533	5,365067
6	118	0,03	0,1	0,747833	4,5039
7	82	0,08	0,1	0,691367	3,9835
8	118	0,08	0,1	0,8623	5,193367
9	69,72773	0,055	0,075	0,414033	2,528667
10	130,2723	0,055	0,075	0,904567	5,043433
11	100	0,012955	0,075	0,4364	2,330167
12	100	0,097045	0,075	0,753033	4,475867
13	100	0,055	0,032955	0,680533	4,089833
14	100	0,055	0,117045	0,7315	3,809733
15	100	0,055	0,075	0,823133	4,725667
16	100	0,055	0,075	0,6915	3,9389
17	100	0,055	0,075	0,690567	3,4495
18	100	0,055	0,075	0,7637	4,0544
19	100	0,055	0,075	0,741467	4,1217
20	100	0,055	0,075	0,7607	3,912167

A Tabela 6 apresenta a ANOVA para a resposta Ra das peças de superfície côncava. Inicialmente, pelos valores obtidos para os coeficientes de determinação, pode-se constatar que 99,26% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, segundo R^2_{adj} , e o modelo apresenta capacidade de previsão de novas observações de 85,08%, conforme R^2_{pred} . Pode-se concluir pela ANOVA que o fator estatisticamente significativo é fz, uma vez que o p-valor foi menor que o valor de alfa, considerando o nível de significância adotado $\alpha = 0,05$. Vê-se também que não existem interações significativas.

Tabela 6. ANOVA para Ra, superfície côncava (Fonte: autoria própria).

Fonte	Graus de liberdade	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	9	2763,88	307,098	285,8	0
Linear	3	40,1	13,366	12,44	0,001
Vc	1	4,11	4,106	3,82	0,079
Fz	1	24,52	24,519	22,82	0,001
Ae	1	2,78	2,779	2,59	0,139
Quadrático	3	21,71	7,236	6,73	0,009
Vc*Vc	1	0,27	0,268	0,25	0,628
fz*fz	1	20,19	20,187	18,79	0,001
ae*ae	1	0,37	0,373	0,35	0,569
Interação de dois fatores	3	20,1	6,7	6,24	0,012
Vc*fz	1	0,37	0,365	0,34	0,573
Vc*ae	1	2,1	2,098	1,95	0,193
fz*ae	1	3,7	3,701	3,44	0,093
Erro	10	10,74	1,074		
Lack-of-Fit	5	5,57	1,114	1,08	0,469
Erro simples	5	5,18	1,035		
Total	19	2774,62			
Soma	R ²	R ² (adjunto)	R ² (predito)		
1,03657	99,61%	99,26%	85,08%		

O modelo de regressão linear com interação para Ra nas peças de superfície côncava foi descrito conforme Eq. (5):

$$Ra = 0,963 - 0,0138 Vc + 12,06 fz - 2,50 ae + 0,000038 Vc*Vc - 70,0 fz*fz - 9,3 ae*ae + 0,0350 Vc*fz + 0,0836 Vc*ae - 62,0 fz*ae \quad (5)$$

A Figura 8 apresenta o gráfico do efeito principal que foi significativo para Ra.

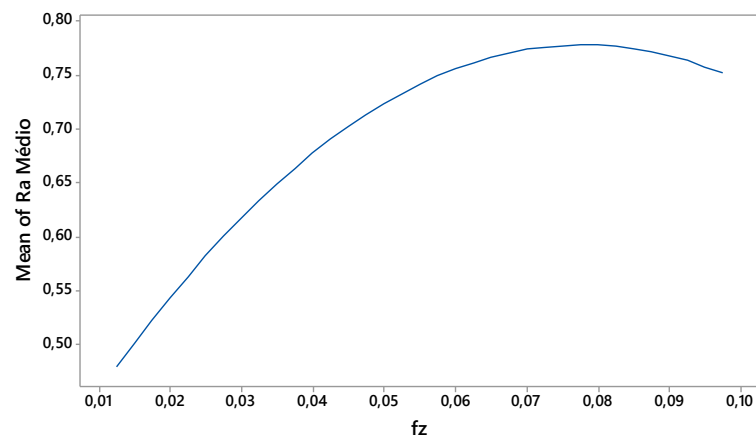


Figura 8. Gráfico do efeito principal para Ra, superfície côncava (Fonte: autoria própria).

A Tabela 7 apresenta a ANOVA para a resposta Rz das peças de superfície côncava. Inicialmente, pelos valores obtidos para os coeficientes de determinação, pode-se constatar que 96,19% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo, segundo R²_{adj}, e o modelo apresenta capacidade de previsão de novas observações de 90,35%, conforme R²_{pred}. Pode-se concluir pela ANOVA que o fator estatisticamente significativo é fz, uma vez que o p-valor foi menor que o valor de alfa, considerando o nível de significância adotado $\alpha = 0,05$. Vê-se também que não existem interações significativas.

Tabela 7. ANOVA para Rz, superfície côncava (Fonte: autoria própria).

Fonte	Graus de liberdade	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	9	568,839	63,204	54,26	0
Linear	3	53,038	17,679	15,18	0
Vc	1	6,631	6,631	5,69	0,038
fz	1	35,013	35,013	30,06	0
ae	1	3,672	3,672	3,15	0,106
Quadrático	3	12,672	4,224	3,63	0,053
Vc*Vc	1	1,88	1,88	1,61	0,233
fz*fz	1	7,97	7,97	6,84	0,026
ae*ae	1	3,002	3,002	2,58	0,139
Interação de dois fatores	3	32,148	10,716	9,2	0,003
Vc*fz	1	2,152	2,152	1,85	0,204
Vc*ae	1	1,481	1,481	1,27	0,286
fz*ae	1	10,048	10,048	8,63	0,015
Erro	10	11,649	1,165		
Lack-of-Fit	5	5,757	1,151	0,98	0,51
Erro simples	5	5,892	1,178		
Total	19	580,488			
Soma	R ²	R ² (adjunto)	R ² (predito)		
1,0793	97,99%	96,19%	90,35%		

O modelo de regressão linear com interação para Ra nas peças de superfície côncava foi descrito conforme Eq. (6):

$$R_z = 8,79 - 0,1320 V_c + 49,2 f_z - 33,1 a_e + 0,000456 V_c * V_c - 252,6 f_z * f_z + 223 a_e * a_e + 0,466 V_c * f_z + 0,423 V_c * a_e - 622 f_z * a_e \quad (6)$$

A Figura 9 apresenta o gráfico do efeito principal que foi significativo para R_z.

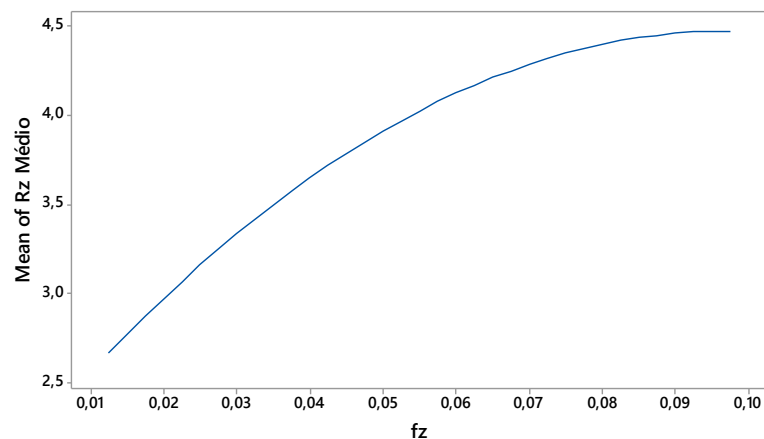


Figura 9. Gráfico do efeito principal para R_z, superfície côncava (Fonte: autoria própria).

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, os modelos das respostas Ra e Rz do processo de fresamento de superfícies complexas, foram obtidos com ótimos valores de ajuste através de planejamento fatorial CCD completo e sem réplicas, levando em consideração que os fatores de controle avaliados foram a velocidade de corte (Vc), avanço por dente (fz) e a profundidade radial de corte (ae). O efeito de cada fator de processo foi avaliado e dessa maneira percebeu-se que para as peças de superfície convexa em Ra, os fatores significativos foram fz e ae e a interação fz*ae. Já em Rz, os fatores significativos foram Vc, fz, ae e as interações Vc*ae e fz*ae. Para as peças de superfície côncava em Ra, o fator

significativo foi f_z , não havendo interações significativas. Em R_z o fator significativo também foi f_z e não houveram interações significativas.

4. AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação no CONEM 2018.

5. REFERÊNCIAS

- Arruda, e. M., brandão, l. C., luiz, s., & ribeiro, m. (2012). Integrated optimization using mixture design to confirm the finishing of aisi p20 using different cutting strategies and ball nose end mills. *Measurement*, 47, 54–63. [Http://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.052](http://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.052)
- Boujelbene, m., moisan, a., bouzid, w., torbaty, s., materials, t. M., machining, h. S., & production, m. (2007). Variation cutting speed on the five axis milling, 21(2), 7–14.
- Buenos, a. A. Et al. Metodologia de superfície de resposta aplicada à medição de tensões em chapas. Congresso nacional de engenharia mecânica, campina grande, brasil, 2010.
- Cappetti, n., naddeo, a., vellecco, f. Fuzzy approach to measures correction on coordinate measuring machines: the case of hole-diameter verification. *Measurement* 93, 2016, p. 41-47
- Caruso, s., outeiro, j. C., umbrello, d., saoubi, r. M. Modeling and experimental validation of the surface residual stresses induced by hard machining of aisi h13 tool steel. *International journal of material forming*, 2010, vol.3, pp. 515-518.
- Cecon, p. R., da silva, a. R. Introdução à metodologia de superfícies de resposta, apostila, ufv, viçosa, 2011.
- Machado, a.r., da silva, m.b., usinagem dos metais, apostila, 8a versão, edufu, uberlândia, 2004, 257 p.
- Myers, r.h., montgomery, d.c., anderson-cook, c.m., 2009, “response surface methodology: process and product optimization using designed experiments”, john wiley & sons, cap.1, usa, pp. 1-13.
- Nicola, g. L. Caracterização de superfícies usinadas em aço endurecido. Dissertação de mestrado, ucs, caxias do sul, 2007.
- Son, j., vavra, j., li, y., seymour, m., forbes, v. Interactions between suspension characteristics and physicochemical properties of silver and copper oxide nanoparticles: a case study for optimizing nanoparticle stock suspensions using a central composite design. *Chemosphere* 124, 2015, pp. 136-142.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF THE FINISHING OF PARTS WITH COMPLEX GEOMETRIES USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Kathlen Lopes Fazzion, kathlen.fazzion@hotmail.com¹
Jéssica Tito Vieira, jessica.tito@hotmail.com¹
Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹
Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufs.br¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br¹

¹Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei, MG

Abstract: One of the areas of modern manufacture that presents a high level of demand and complexity is the manufacture of metal molds. It should be noted that practically all consumer goods, especially white goods, have plastic parts that are manufactured from the injection of molds or the stamping of metal matrices. Therefore, the milling process becomes paramount for the fabrication of matrices with complex geometries. The objective of this work was the study of the dimensional deviation of molds with complex surfaces made by milling with spherical tools in AISI H13 steel. The response surface methodology was used to plan the experiments and model the dimensional deviation. Two plans were carried out for three factors, one for a convex surface and one for a concave surface, where the parameters varied were the cutting speed, the feed per tooth and the radial depth of cut. The results showed that for the convex surface pieces, the significant factors in common for the roughness were the advance per tooth, the lateral depth of cut and the interaction between these two parameters. On the other hand, for the concave surface parts, also for the roughness, the significant factor was only the advance per tooth, with no significant interactions.

Keywords: Milling, Molds and Arrays, Response Surface Methodology, Roughness R_a , Roughness R_z .