

ANÁLISE FATORIAL DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA VIBRAÇÃO E RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO CILINDRICO EXTERNO DO AÇO ABNT 1020

Hellen Cristina Pires Souza, hellenpires@hotmail.com¹
Rosália Sousa Andrade, rosalia.s.andrade@gmail.com¹
Antônio Santos Araujo Junior, asaraujojr@ifma.edu.br¹
Washington Silva do Nascimento, nasciws.engenharia@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Departamento de Mecânica e Materiais – DMM, Avenida Getúlio Vargas, Nº 04, Monte Castelo, São Luís – MA. CEP: 65030-005.

Resumo: A qualidade superficial de uma peça usinada depende de vários aspectos, mas principalmente dos parâmetros de corte utilizados. Diante disso, objetivo deste artigo foi identificar os efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade superficial e a vibração mecânica do sistema, obtidas experimentalmente no processo torneamento cilíndrico externo do aço ABNT 1020, variando-se os parâmetros de entrada: velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). Para isso, foi utilizado no planejamento experimental, a análise fatorial completa (DOE) de 2^3 (três fatores com dois níveis cada) para verificar qual parâmetro apresentava maior influência nos níveis de rugosidade e vibração obtidos. Os resultados foram correlacionados e foi evidenciado através dos gráficos de pareto e da análise dos efeitos principais, que o avanço (f) foi o mais expressivo na análise dos fatores que interferiram no resultado do acabamento superficial da peça, seguido da velocidade de corte, porém, esta última de maneira um pouco menos acentuada, pois em velocidades de corte mais elevadas, o acabamento superficial torna-se insensível às variações da velocidade de corte. Já o aumento do avanço, contribui para o aumento da distância entre picos, o que eleva a amplitude da rugosidade. Enquanto que os parâmetros de rotação e profundidade de corte não resultaram em alterações significativas na vibração. Por fim, se verificou que um avanço menor e uma velocidade de corte maior conduzem a obtenção de melhorias significativas no acabamento superficial da peça, ou seja, os parâmetros analisados são estatisticamente significantes na respostas obtidas.

Palavras-chave: Rugosidade superficial. Vibração. Parâmetros de corte.

1. INTRODUÇÃO

O controle da qualidade de componentes mecânicos é essencial para o sucesso de qualquer processo de manufatura. Para processos de acabamento, o controle de parâmetros como: rugosidade e integridade física da superfície são fundamentais para garantir o desempenho adequado dos componentes fabricados. Deste modo, os fabricantes de metais e ferramentas precisam conhecer a fundo tais efeitos, motivo pelo qual ensaios de usinabilidade têm sido pesquisados por diferentes setores como forma de melhorar o desempenho do material no processo de usinagem (Costa e Santos, 2006).

Um dos processos de fabricação mais utilizados atualmente é o processo de usinagem por torneamento, que confere forma específica às peças e se utiliza da energia mecânica como fonte principal de trabalho. Tal processo emprega como máquina-ferramenta os tornos convencionais ou centros de torneamento acionados por comando numérico. Com esse processo, é possível a obtenção de superfícies de revolução com ajuda de uma ou mais ferramentas. Para tanto, é preciso que a peça gire a determinada frequência, o que se consegue por meio do parâmetro rotação (em rotação por minuto), e que a ferramenta de corte avance contra a ferramenta, levando ao chamado “movimento de avanço”. Esse movimento é possível pela especificação do parâmetro avanço (em mm/ revolução) (Ferraresi, 1985).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar como alguns dos principais fatores do torneamento influenciam na rugosidade superficial das amostras e na vibração do conjunto máquina ferramenta, por meio de comparativos tanto da qualidade das diferentes superfícies criadas de forma qualitativa, como estabelecendo de forma quantitativa qual combinação de fatores favorecem a obtenção das melhores condições de usinagem. Para isso, foram realizados ensaios utilizando aço ABNT 1020, em condições combinadas por meio de planejamento e análise fatorial, utilizando como variáveis de entrada: Velocidade de corte, força de avanço e profundidade de corte. Já as variáveis de saída foram: Rugosidade média (R_a), máxima (R_y) e Vibração.

2. REVISÃO DE LITERATURA

No torneamento, que é um processo mecânico de usinagem, uma peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o eixo referido (Pereira, 2018).

Este processo, assim como todo processo de usinagem, possui parâmetros de entrada responsáveis por garantir sua execução. Alguns desses parâmetros estão diretamente ligados com a qualidade da superfície da peça usinada. Dentre os que mais se destacam, no processo de torneamento, estão a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, etc (Silva, 1998).

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, conforme a direção e o sentido de corte. Já o avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta. Enquanto que a profundidade ou largura de usinagem (a_p), trata-se da profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (Diniz, Marcondes e Coppini 2013).

A velocidade de corte pode ser obtida pela Eq. 1:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

onde D = diâmetro da peça e n = rotação do eixo principal.

Em qualquer processo de usinagem existe um nível máximo das vibrações tolerável, que vai depender do tipo de aplicação (Werner, 1992). Dependendo da amplitude de vibração que ocorre no processo, ele vai ser caracterizado como instável ou estável. Em condições de estabilidade, o resultado do processo pode ser caracterizado relativamente por boa qualidade da superfície e reduzido desgaste de ferramenta, enquanto que um instável é associado a um acabamento de superfície deteriorado e desgastes pronunciados de ferramenta (Polli, 2005).

O acabamento superficial das peças é medido através da rugosidade superficial, que é expressa em microns. A medição da rugosidade ocorre através de um equipamento chamado rugosímetro. Segundo a norma ABNT NBR 6405 (1985) a rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. A NBR 6485 (1985) adota o sistema de medição da linha média como parâmetro de rugosidade. Os parâmetros de rugosidades encontrados são: Rugosidade máxima (R_y) que mede o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (Bruns; Poffo; Brandt, 2011).

Conforme Nery (2013), um dos diversos parâmetros que quantifica a rugosidade é o desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a), que é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento y_i dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição, conforme mostrado a Eq. 2.

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (2)$$

As condições de corte exercem grande influência sobre a rugosidade, sendo o avanço que produz o maior efeito, uma vez que as alturas dos picos e profundidades dos vales tendem a aumentar numa proporção quadrática com o avanço (Nery, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Planejamento experimental

O experimento foi planejado com o intuito de usar a análise fatorial completa (2^3) para avaliar de que maneira os fatores como velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) influenciaram na vibração e rugosidade superficial no torneamento externo de uma barra cilíndrica. Segundo Muñoz-Escalona e Cassier (1998) e Capello (2005), estes parâmetros são grandes responsáveis pela integridade da superfície de ligas metálicas como o aço ABNT 1020. A Tabela 1 apresenta a quantidade de ensaios realizados e os valores das variáveis de entrada utilizadas em cada teste.

Tabela 1. Parâmetros de entrada utilizados

Ensaios	v_c (m/min)	f (mm/min)	a_p (mm)
1	47	0,125	1,0
2	75	0,125	1,0
3	47	0,20	1,0
4	75	0,20	1,0
5	47	0,125	1,5
6	75	0,125	1,5
7	47	0,20	1,5
8	75	0,20	1,5

3.2. Materiais

O material utilizado foi uma barra de seção circular de diâmetro inicial de 2" e de comprimento de 200 mm de aço ABNT 1020 produzido pelo processo de extrusão, que foi fornecida pelo Departamento de Mecânica e Materiais – DMM do IFMA. A composição química do corpo de prova está apresentada na Tab. 2:

Tabela 2. Composição química do aço ABNT 1020

Composição Química (% em pesos)				
C	Mn	P	S	Si
0,18/0,23	0,30/0,60	0,04	0,05	-

A Figura 1 mostra que o corpo de prova foi preparado com 3 (quatro) seções com 60 mm de comprimento cada e 40 mm de diâmetro, separadas por canais com 5 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro, de modo que cada uma das seções serviu para o ensaio em uma condição de usinagem específica, estabelecida na Tab. 1.



Figura 1. Corpo de prova

A máquina-ferramenta utilizada na fase experimental foi um torno convencional NARDINI – ND 250 BE, modelo apresentado na Fig. 2, instalado no Laboratório de Usinagem do DMM, do IFMA – Monte Castelo. A ferramenta de corte utilizada foi de aço rápido HSS – *High Speed Steel*.



Figura 2. Máquina-ferramenta: torno convencional

Para medição das variáveis de saída foram utilizados um rugosímetro portátil TR220, apresentado na Fig. 3a, e um sensor de vibração (acelerômetro) MV-670, apresentado na Fig. 3b, que servem para coletar, respectivamente, os dados de rugosidade na superfície do corpo de prova e vibração da máquina-ferramenta.

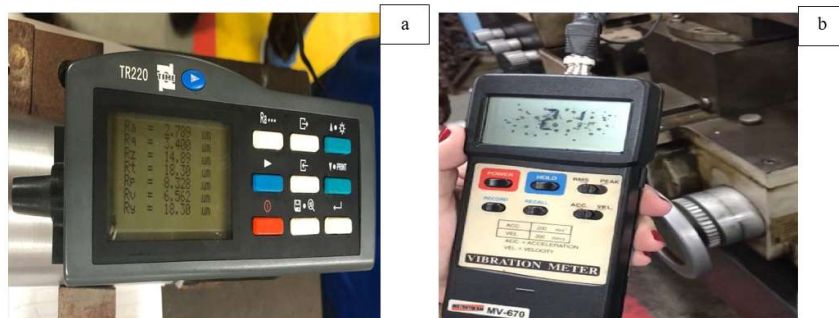


Figura 3. Instrumentos de medição. a) Rugosímetro. b) Acelerômetro.

3.3. Procedimento

O procedimento experimental seguiu as seguintes etapas:

1. Fixação da peça na placa universal do torno e posicionamento da ferramenta de corte;
2. O corpo de prova sofreu um passe de torneamento a partir de sua condição superficial bruta, bastante irregular, devido a oxidação, conforme mostra a Fig. Y;
3. Posicionamento do sensor de vibração (acelerômetro) sobre o porta-ferramenta;
4. Torneamento a seco do corpo de prova para cada seção sob parâmetros de entrada pré-estabelecidos;
5. Medições de vibração, concomitante ao processo de usinagem, para cada condição estabelecida;
6. Medições de rugosidade para cada condição estabelecida;
7. Análise fatorial completa.

Para cada condição, foram medidas a amplitude de vibração e o perfil de rugosidade da superfície usinada, com uso de um acelerômetro e um rugosímetro. Sendo que o rugosímetro foi colocado na posição transversal, ou seja, paralelamente à direção de avanço. Para se obter mais precisão no resultado da medição, a barra cilíndrica foi posicionada sobre uma base metálica uniforme e apoiada por tarugos para que não se movimentasse. A rugosidade foi medida em três posições axiais em cada seção do corpo de prova.

Cada leitura avaliou os parâmetros de rugosidade média (R_a), que corresponde à média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição e por esta razão possuiu pouca diferenciação entre picos ou vales que se encontram abaixo da linha média.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerou-se o planejamento fatorial de 2^3 (três fatores de controle com dois níveis cada um), com 8 combinações de condições de usinagem. As variáveis de entrada foram definidas como: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte e as saídas: rugosidade média, máxima e vibração do conjunto. Os dados combinados estão descritos na Tab. 3:

Tabela 3 – Dados de combinações do planejamento fatorial

Ensaio	v_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	Rugosidade média R_a (μm)	Rugosidade máxima R_y (μm)	Vibração (m/s^2)
1	47	0,125	1,0	3,963	25,665	11,200
2	75	0,125	1,0	3,155	25,322	9,867
3	47	0,20	1,0	8,385	40,125	5,933
4	75	0,20	1,0	3,727	20,692	11,567
5	47	0,125	1,5	3,144	20,935	19,467
6	75	0,125	1,5	2,463	17,553	14,300
7	47	0,20	1,5	3,906	27,603	7,300
8	75	0,20	1,5	5,252	33,192	13,900

4.1. Rugosidades média e máxima

Conforme os dados obtidos observam-se que os valores de R_a são mais baixos quando comparados à R_y . Isso ocorre por ser calculado como uma média de todos os picos e vales encontrados na superfície, encobrindo assim algum possível risco, por exemplo. Já o parâmetro R_y é calculado com base nos maiores valores de picos e vales. Isto pode ser verificado na Fig. 4.

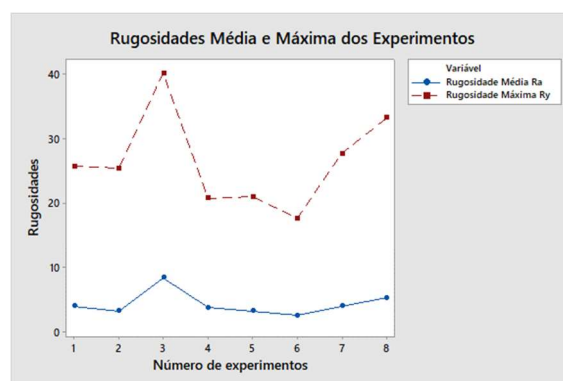


Figura 4. Dados de rugosidades média e máxima obtidos experimentalmente

Ao analisar os efeitos dos fatores nos dados de rugosidade obtidos pode-se verificar através das Fig. 5 e 6 que tanto para R_a quanto para R_y o fator que mais influenciou no aumento da rugosidade, ou seja, na piora do acabamento superficial, foi o avanço.

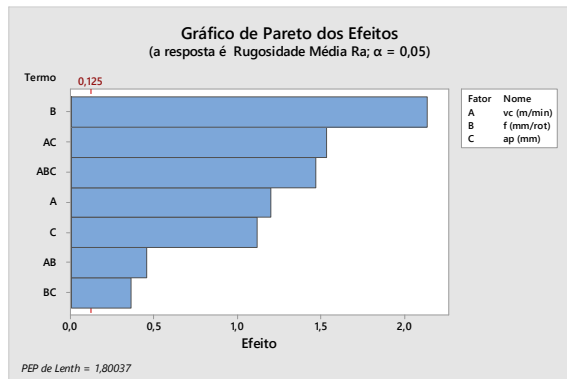


Figura 5. Efeitos dos fatores na rugosidade média

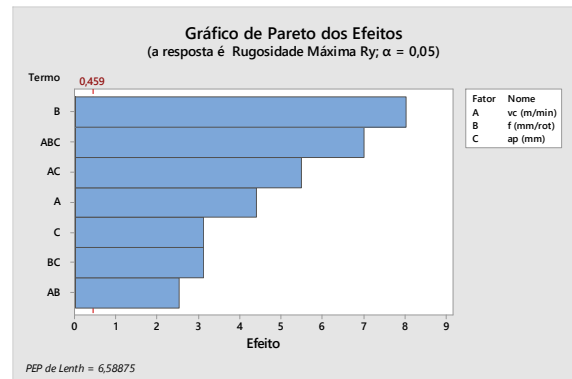


Figura 6. Efeitos dos fatores na rugosidade máxima

Ao analisar individualmente os efeitos principais, se pode observar que quando o avanço foi menor e a velocidade de corte foi maior, se obteve valores médios menores tanto para R_a , quanto para R_y . Isto pode ser observado nas Fig. 7 e 8. Ou seja, a combinação de parâmetros com menor avanço e maior velocidade de corte tendem a reduzir os efeitos da rugosidade na peça, produzindo um melhor acabamento superficial.

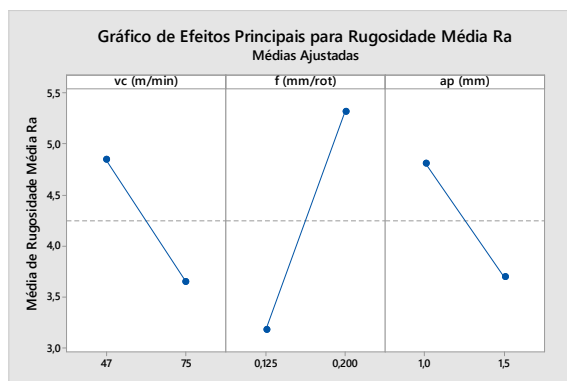


Figura 7. Efeitos principais na rugosidade média

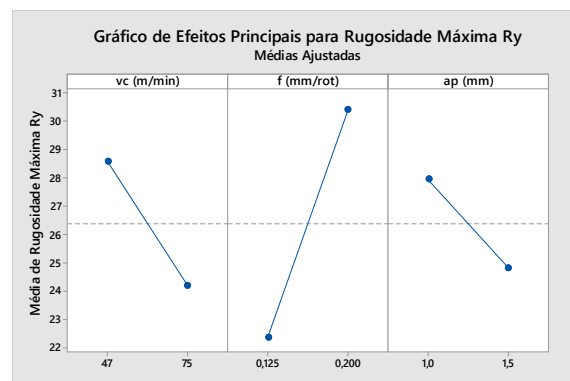


Figura 8. Efeitos principais na rugosidade máxima

As Figuras 9 e 10 representam as condições de usinagem dos experimentos 2 e 6 com menor avanço e maior velocidade de corte, que apresentaram o melhor acabamento superficial.

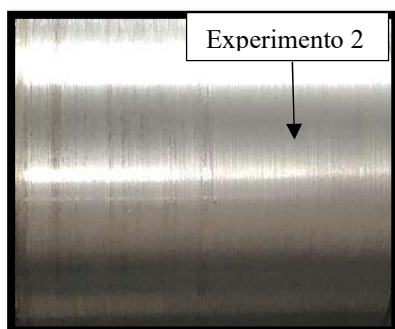


Figura 9. Superfície usinada do experimento 2

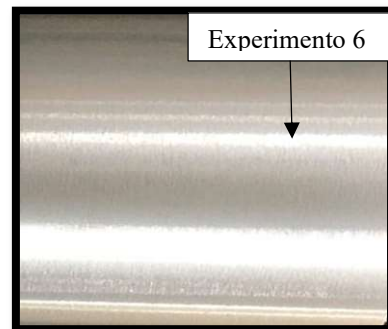


Figura 10. Superfície usinada do experimento 6

Desta maneira, em um processo de torneamento para se obter uma rugosidade baixa deve-se utilizar avanços pequenos, uma vez que a escolha adequada do avanço se torna fundamental para o controle do acabamento da peça usinada, já que seu valor deve satisfazer o acabamento pretendido da peça.

Assim, dentre as condições analisadas, a que apresentou uma menor rugosidade e consequentemente um melhor acabamento superficial foi obtida no experimento de número 6, conforme destacado no gráfico de cubo, representado nas Fig. 11 e 12, que combina as características de maior velocidade de corte, menor avanço e maior profundidade de corte.

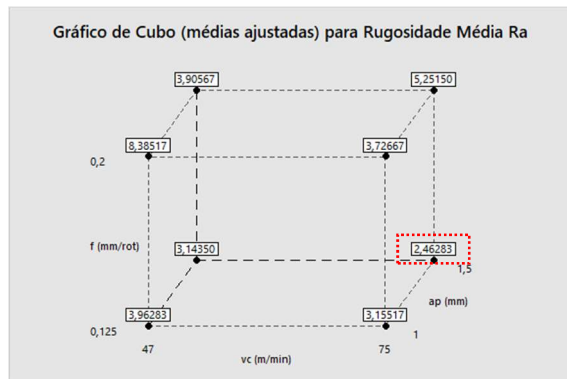


Figura 11. Gráfico de cubo para rugosidade média (Ra)

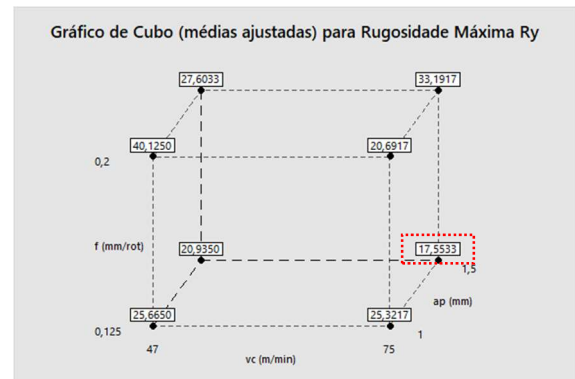


Figura 12. Gráfico de cubo para rugosidade máxima (Ry)

Portanto, pode-se verificar que para obtenção de uma boa qualidade superficial é necessária uma combinação de parâmetros ideais (e não a modificação de um só parâmetro) que dependem do nível de rugosidade desejada, que consequentemente está relacionado com a função que a peça vai desempenhar.

4.2. Vibração do conjunto

O gráfico da Figura 13 mostra os dados de vibração mecânica obtidos nos 8 experimentos realizados. De uma maneira geral, há uma tendência de crescimento dos níveis de vibração com o aumento dos parâmetros (v_c , f , e a_p). As vibrações exercem grande influência sobre a qualidade superficial da peça. A textura da superfície resulta dos movimentos combinados de rotação, avanço e vibrações entre a ferramenta e a peça. Cortes estáveis resultam em superfícies com marcas de avanço bem definidas e baixa rugosidade (Lara, 2017).

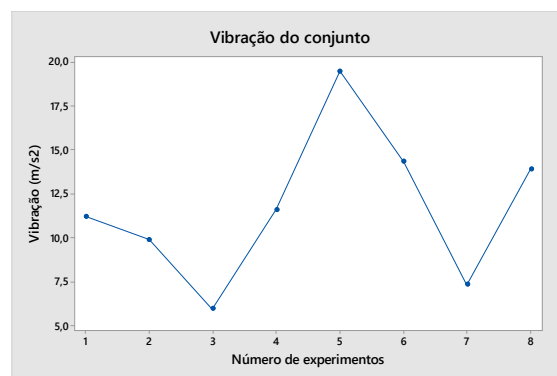


Figura 13. Gráfico de série para o efeito de vibração do conjunto

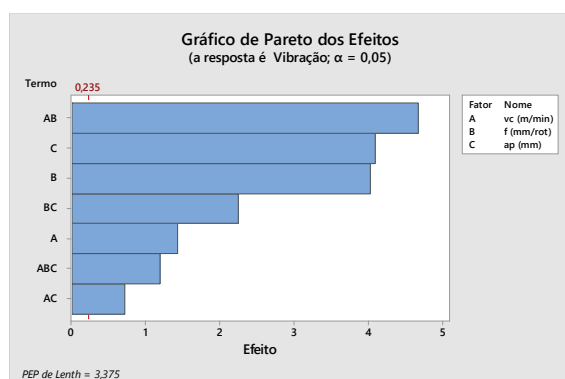


Figura 14. Efeitos dos fatores na vibração

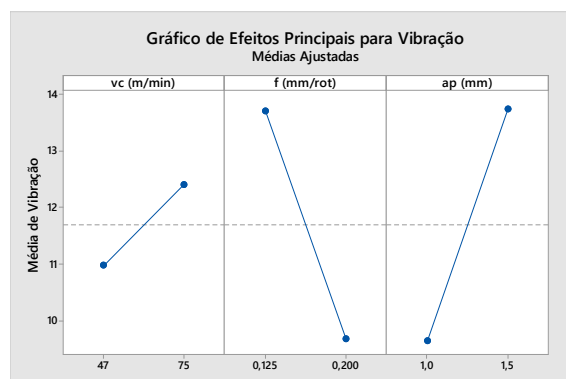


Figura 15. Efeitos principais na vibração

Ao analisar os efeitos dos fatores nos dados de vibração do conjunto pode-se verificar através do gráfico de Pareto representado na Fig. 14 que quem mais influenciou no aumento da vibração foi a combinação dos parâmetros velocidade de corte e avanço. Já o gráfico de efeitos principais, mostrado na Fig. 15 demonstra que para um avanço maior com profundidade menor são obtidos melhores valores de vibração (mais baixos).

Observa-se ainda que as maiores amplitudes de vibrações que provocam maior retirada de material, produzindo vales na superfície da peça, porém as amplitudes das vibrações não foram suficientemente altas para deixarem marcas expressivas na superfície da peça. Isto pode ser observado na Fig. 16, que mostra a superfície usinada no experimento 5 (que apresentou a condição mais severa em amplitude de vibração). Deste modo, como resultado dos ensaios realizados, apesar de haver situações com amplitudes elevadas de vibração os cortes mostraram-se estáveis mesmo com o aumento de rotação. A combinação dos parâmetros de velocidade e profundidade de corte, representada pelo gráfico de contorno na Fig. 17.

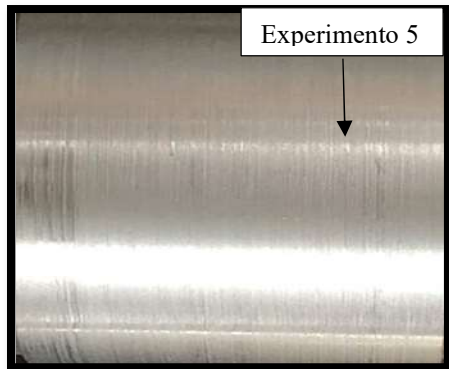


Figura 16. Superfície usinada do experimento 5

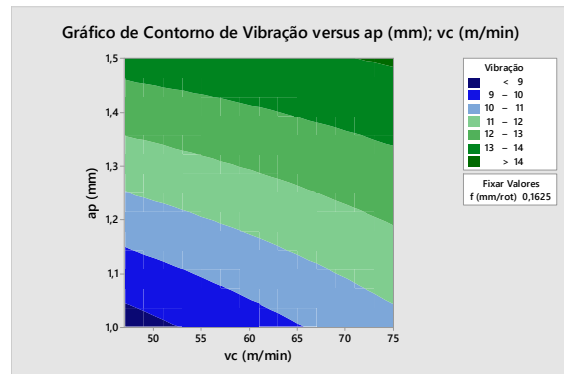


Figura 17. Gráfico de série para o efeito de vibrações do conjunto

Assim, foi obtido de forma experimental que há um aumento significativo na vibração à medida que é feito o incremento de tais parâmetros.

5. CONCLUSÃO

Através do estudo realizado, observou-se que o planejamento fatorial para análise dos efeitos de parâmetros de usinagem se mostrou bastante eficaz, visto que a separação das amostras por grupos se mostrou significativa para analisar os efeitos semelhantes que uma combinação adequada ou não de fatores que a usinagem pode causar.

Dentre os parâmetros avaliados, o avanço foi o mais expressivo na análise dos fatores que trouxeram respostas significativas em termos das variáveis de saída: acabamento superficial e vibração. O aumento da velocidade de corte também resultou na melhoria do acabamento superficial da peça. Entretanto este aumento se deu de forma bem menos significativa do que o obtido com a diminuição do avanço.

Os valores escolhidos para os parâmetros de rotação e profundidade de corte, e suas variações, não resultaram alterações significativas na vibração e no acabamento das amostras usinadas.

Este estudo permitiu a obtenção de dados para escolha de condições de corte adequadas de modo a evitar desgaste prematuro nas ferramentas, acabamento superficial inadequado e vibração indesejada do conjunto. E, com a combinação adequada destes parâmetros os componentes usinados apresentam como resultado maior, a qualidade.

6. REFERÊNCIAS

- Bruns, D. F., Poffo, E. E., Brandt, S., 2011, “Trabalho experimental de análise da rugosidade a usinagem do aço SAE 1020 com e sem adição de material por solda MAG”, In *6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Caxias do Sul, Brasil.
- Capello E., 2005, “Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, p. 221–228.
- Costa, E. S., Santos, D. J., 2006, “Disciplina: Processo de Usinagem”. UEMG, Divinópolis
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2013, *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo, 8ª Edição.
- Ferraresi, Dino. 1985, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 3ª Edição.
- Jesus, R. E. J.. 2013, *Avaliação dos esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei.

Lara, A.P., 2017, *Análise das Vibrações no Processo de Torneamento Interno da Liga de Alumínio 6351-t6*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 121f.

Muñoz-Escalona P., Cassier Z., 1998, *Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel*, Wear, vol. 218, p.103-109.

Nery, W. S., 2013, *Investigação experimental da variação da rugosidade com o aumento das forças de usinagem no torneamento*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Pereira, C. A. P., 2018, *Processos de usinagem em torno mecânico convencional*, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Silva, M.B., 1998, *Lubrication in metal cutting under built-up edge conditions*, Tese de doutorado, University of Warwick, Warwick.

Thomson, W. T., Dahleh, M. D., 1998, *Theory of vibration with applications*, Prentice Hall, New Jersey, 5ª edição

Polli, M. L. 2005, *Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Werner, A. 1992, *Prozeßauslegung und Prozeßsicherheit beim Einsatz von schlanken Schaftfräser*. Dissertação de mestrado, RWTH Aachen University, Aachen.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FACTORIAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON VIBRATION AND SURFACE ROUGHNESS ON EXTERNAL CYLINDRICAL TURNING OF ABNT 1020 STEEL

Hellen Cristina Pires Souza, hellenpires@acad.ifma.edu.br¹

Rosália Sousa Andrade, rosalia.s.andrade@gmail.com¹

Antonio Santos Araujo Junior, asaraujojr@ifma.edu.br¹

Washington Silva do Nascimento, nasciws.engenharia@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Avenida Getúlio Vargas, Nº 04, Monte Castelo, São Luís – MA. CEP: 65030-005.

Abstract: The surface quality of a machined part depends on several aspects, but mainly on the cutting parameters used. Therefore, the objective of this article is to identify the effects of the surface roughness and mechanical vibration of the system, obtained experimentally in the ABNT 1020 steel external cylindrical turning process, varying the input parameters: cutting speed (v_c), feed (f) and depth of cut (a_p). For this, in the experimental design, a complete factor analysis (DOE) of 2^3 (three factors with two levels each) was used to verify which parameter had the greatest influence on the levels of roughness and vibration obtained. The results were correlated and it was evidenced through the Pareto and the analysis of the main effects, that the feed rate (f) was the most expressive in the analysis of the factors that interfered in the result of the surface finish of the workpiece, followed by the cutting speed, however, the latter a little less accentuated, because at higher cutting speeds, the surface finish becomes insensitive to variations in cutting speed. The increase in feed rate, on the other hand, contributes to the increase in the distance between peaks, which increases the amplitude of the roughness. While the parameters of rotation and depth of cut did not result in significant changes in vibration. Finally, it was found that a lower feed and a higher cutting speed lead to significant improvements in the surface finish of the part, that is, the parameters analyzed are statistically significant in the responses obtained.

Keywords: Surface roughness. Vibration. Cutting parameters.

RESPONSIBILITY NOTICE

Authors are solely responsible for the content of this work.