

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A RUGOSIDADE DO AÇO AISI 4340 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Guilherme Lopes Brandão

Pedro Márcio do Carmo Silva

Camilo Lellis dos Santos

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei - DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36.307-352, São João del-Rei - MG
gui.lopes.brandao@gmail.com; pmcs_sjdr@hotmail.com; camilo_santos@ufsj.edu.br; lincoln@ufsj.edu.br

Étory Madrilles Arruda

João Roberto Ferreira

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

Resumo. Os processos de remoção de material são amplamente empregados no setor metal-mecânico, sendo o torneamento o processo mais utilizado devido sua flexibilidade na produção de componentes mecânicos. O aço AISI 4340 tem grande aplicação no setor metal-mecânico, sendo na maioria das vezes usinado pelo processo de torneamento. O aço AISI 4340 é utilizado na fabricação de rolamentos, engrenagens, virabrequins, cames, trens de pouso de aviões, peças de tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Assim, o objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade do aço AISI 4340 no processo de torneamento. A ferramenta utilizada foi um inserto de metal duro da classe M e as variáveis de controle foram a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte. Os resultados demonstram que, nas análises individuais, pôde-se verificar que a velocidade de corte e o avanço apresentaram influência significativa sobre a rugosidade da peça. As interações duplas e a interação tripla entre os parâmetros de corte também apresentaram significância estatística sobre a rugosidade. Pode-se concluir que o avanço é o parâmetro de corte que apresentou maior influência sobre a rugosidade.

Palavras chave: Acabamento superficial. Aço AISI 4340. Torneamento.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos componentes mecânicos que o setor metal-mecânico produz são fabricados por processos que envolvem a remoção de material na forma de cavaco. Segundo Singaravel *et al.* (2018), o torneamento é um processo de usinagem primário e importante, que permite fabricar peças com uma enorme variedade de formas e dimensões. Nas modernas indústrias de usinagem a busca por melhoria da qualidade da superfície usinada é contínua e depende basicamente da otimização das variáveis dos processos. Nos processos de fabricação de precisão, a etapa de acabamento é a mais crítica e dispendiosa de todo o processo (Mishra *et al.*, 2014). Isto ocorre devido aos níveis micro e nanométricos de acabamento superficial exigidos em componentes mecânicos de peças aeronáuticas, automotivas e biocomponentes, por exemplo (Patole e Kulkarni, 2018a; Mishra *et al.*, 2014).

O aço AISI 4340 é caracterizado por possuir elevada resistência mecânica, sendo utilizado com frequência em indústrias aeronáuticas e automotivas para a fabricação de rolamentos, engrenagens, virabrequins, eixos, cames e trens de pouso de aviões, que exigem tolerâncias geométricas mais rígidas, maior vida e bom acabamento superficial (Rashid *et al.*, 2013). A crescente demanda por melhor qualidade superficial e tolerâncias geométricas mais rígidas em tais produtos resultaram no interesse em pesquisas com este aço. Singaravel *et al.* (2018) utilizaram a metodologia de decisão multicritério (MCDC) no processo de torneamento do aço AISI 4340 com o objetivo de otimizar simultaneamente a rugosidade, a micro dureza e a taxa de remoção de material. Além disso, os autores avaliaram a influência da velocidade de corte, do avanço da ferramenta, da profundidade de corte e do revestimento da ferramenta sobre as respostas. Assim, os autores verificaram que o aumento do avanço promoveu o aumento da rugosidade R_a , e também que o aumento da velocidade de corte promoveu a formação de cavacos descontínuos, resultando na melhoria do acabamento superficial.

Patole e Kulkarni (2018b) utilizaram a metodologia de Taguchi para otimizar os esforços de corte e a rugosidade do aço AISI 4340 no processo de torneamento. Segundo os autores, os experimentos de torneamento foram realizados utilizando-se um lubrificante nano fluido através da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL). Desta forma, foi avaliada a influência da velocidade de corte, do avanço da ferramenta, da profundidade de corte e do raio de ponta da

ferramenta sobre as respostas analisadas. Assim, os autores verificaram que todos os parâmetros de corte influenciaram estatisticamente a rugosidade R_a , sendo o avanço da ferramenta o parâmetro de corte mais influente.

Khare e Agarwal (2017) também utilizaram a metodologia de Taguchi para otimizar a rugosidade do aço AISI 4340 no processo de torneamento. Segundo os autores, os experimentos de torneamento foram realizados utilizando-se nitrogênio líquido como refrigerante. Foi avaliada a influência da velocidade de corte, do avanço da ferramenta, da profundidade de corte e do ângulo de inclinação da ferramenta sobre a rugosidade. Neste caso, os autores verificaram que apenas o avanço da ferramenta não influenciou estatisticamente a rugosidade R_a e que a velocidade de corte foi o parâmetro de corte mais influente. De acordo com Singaravel *et al.* (2018), a obtenção de alto desempenho e a seleção de parâmetros de corte apropriados são tarefas importantes na operação de torneamento. Esta combinação de parâmetros de corte é geralmente selecionada com base em dados do fornecedor da ferramenta e em experiências anteriores. No entanto, segundo os autores, na maioria dos casos isso não é o ideal.

O processo de torneamento é uma das operações fundamentais de usinagem e a otimização dos parâmetros de corte gera uma usinagem com melhor desempenho (Singaravel *et al.*, 2018). No entanto, muitos estudos relativos ao torneamento do aço AISI 4340 que empregam alguma abordagem experimental para a modelagem matemática da função de média da rugosidade da superfície usinada, geralmente desconsidera a possibilidade de avaliar as interações entre os parâmetros de corte (variáveis de controle). A aplicação de abordagens estatísticas em processos de fabricação permite avaliar estas interações e entender seus efeitos e suas contribuições.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) sobre a rugosidade do aço AISI 4340 no processo de torneamento. Tal estudo visou contribuir na seleção dos parâmetros de corte mais adequados para obtenção superfícies com excelentes acabamentos superficiais. Isto permite fabricar produtos dentro das características técnicas e econômicas necessárias. O projeto de experimentos (DOE) e análise de variância (ANOVA) foram utilizados e os resultados são úteis para aplicações em indústrias de fabricação que utilizam o processo de torneamento do aço AISI 4340.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de torneamento foram realizados em um centro de torneamento ROMI® GL 240M, que possui rotação máxima de 6.000 rpm e potência de 22,5 kW. Os corpos de prova utilizados eram seções tubulares de aço AISI 4340, com dureza média de 32 HRC. As dimensões dos corpos de prova eram de 36 mm de diâmetro externo, 24 mm de diâmetro interno e 40 mm de comprimento. Os corpos de prova foram fixados em um suporte específico, para que fosse possível manter o comprimento máximo em balanço dos corpos de provas em 90 mm e também permitir o apoio do contraponto rotativo do centro de torneamento. A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro, código TNMG 160408-WMX, classe GC 4325, com revestimento triplo de $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$, e o porta-ferramentas utilizado possui código MTJNL 2020 K16, ambos da Sandvik Coromant®. Os experimentos de torneamento foram aleatorizados por níveis em um planejamento fatorial completo e cada condição experimental foi repetida três vezes, somando um total de vinte e quatro experimentos. Para cada experimento um corpo de prova novo foi utilizado. As variáveis de controle foram a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte. Os níveis das variáveis de controle foram definidos conforme recomendação do fabricante da ferramenta. A Tabela 1 apresenta as variáveis de controle utilizadas nos experimentos, assim como seus respectivos níveis.

Tabela 1. Variáveis de controle e seus respectivos níveis

Variáveis de controle	Níveis	
	-1	+1
Vc - Velocidade de corte [m/min]	250	350
f - Avanço [mm/rot]	0,12	0,25
ap - Profundidade de corte [mm]	0,8	2,0

A variável de resposta analisada foi a rugosidade dos corpos de prova, avaliada através do parâmetro R_a . Para a medição da rugosidade foi utilizado um perfilômetro Taylor Hobson® C131, configurado com comprimento de amostragem igual a 0,8 mm. Foram realizadas seis medições de rugosidade em cada corpo de prova, sendo três medições realizadas em cada extremidade do corpo de prova e equidistantes entre si em 120°. Os dados obtidos para a rugosidade foram analisados estatisticamente através do software Minitab®. A influência das variáveis de controle e suas interações sobre a resposta foi verificada utilizando a análise de variância (ANOVA) considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta o planejamento fatorial completo utilizado nos experimentos deste trabalho, assim como os valores de rugosidade R_a obtidos. De acordo com a Tab. 2, verifica-se que foram obtidos valores de rugosidade R_a entre

0,640 e 2,830 μm . Estes valores de rugosidade estão em conformidade com valores obtidos por outros autores no torneamento do aço AISI 4340 (Patole e Kulkarni, 2018a, 2018b; Singaravel *et al.*, 2018; Khare e Agarwal, 2017).

Tabela 2. Planejamento fatorial completo e rugosidade Ra

Exp.	Vc [m/min]	f [mm/rot]	ap [mm]	Ra [μm]	Exp.	Vc [m/min]	f [mm/rot]	ap [mm]	Ra [μm]
1	250	0,12	0,8	1,010	13	250	0,12	2,0	0,990
2	350	0,12	0,8	0,675	14	350	0,12	2,0	0,885
3	250	0,25	0,8	2,815	15	250	0,25	2,0	2,830
4	350	0,25	0,8	2,800	16	350	0,25	2,0	2,580
5	250	0,12	2,0	1,160	17	250	0,12	0,8	1,170
6	350	0,12	2,0	0,990	18	350	0,12	0,8	0,640
7	250	0,25	2,0	2,775	19	250	0,25	0,8	2,820
8	350	0,25	2,0	2,695	20	350	0,25	0,8	2,790
9	250	0,12	0,8	1,185	21	250	0,12	2,0	1,030
10	350	0,12	0,8	0,655	22	350	0,12	2,0	1,175
11	250	0,25	0,8	2,795	23	250	0,25	2,0	2,790
12	350	0,25	0,8	2,785	24	350	0,25	2,0	2,660

De acordo com a norma ISO 1302 (2002), os valores de rugosidade Ra apresentados na Tab. 2 podem ser classificados através das classes de rugosidade no intervalo que compreende N5 e N8 (0,4 a 3,2 μm). Em termos de qualidade, estas classes de rugosidade correspondem ao acabamento fino obtido com cuidados especiais em operações de torneamento e também na retificação. Desta forma, pode-se verificar que existem combinações dos parâmetros de corte que proporcionam a obtenção de superfícies com qualidade de retificação.

A Tabela 3 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA) para a rugosidade Ra, considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$. Analisando o P-valor, pode-se verificar que existem interações duplas e triplas entre as variáveis de controle que apresentam influência estatisticamente significativa sobre Ra. Analisando os efeitos individuais das variáveis de controle, verifica-se que a velocidade de corte e o avanço da ferramenta também apresentam influência estatisticamente significativa sobre Ra.

Tabela 3. Análise de variância para a rugosidade Ra

ANOVA - Rugosidade Ra					
Fonte	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Vc	1	0,1734	0,1734	31,75	0,000
f	1	19,386	19,386	3549,61	0,000
ap	1	0,0074	0,0074	1,35	0,263
Vc*f	1	0,0425	0,0425	7,78	0,013
Vc*ap	1	0,0308	0,0308	5,64	0,030
f*ap	1	0,0782	0,0782	14,32	0,002
Vc*f*ap	1	0,1162	0,1162	21,28	0,000
Resíduo	16	0,0874	0,0055		
Total	23	19,9219			
S = 0,0739 R ² = 99,56% R ² (aj.) = 99,37% R ² (pred.) = 99,01%					

De acordo com a Tab. 3, analisando o F-valor, verifica-se que o avanço da ferramenta é a variável de controle que mais influencia a rugosidade Ra, contribuindo com 97,3%. A velocidade de corte contribui com 0,9% e as interações duplas e triplas somadas contribuem com 1,3% na variação de Ra.

Patole e Kulkarni (2018b) também verificaram no processo de torneamento do aço AISI 4340 uma maior influência do avanço da ferramenta sobre a rugosidade da peça usinada. De acordo com Diniz *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2011), o valor da rugosidade máxima teórica é proporcional ao quadrado do valor do avanço, o que corrobora a grande influência do avanço sobre os valores de rugosidade Ra obtidos neste trabalho.

Ainda de acordo com a Tab. 3, o coeficiente de determinação R² igual a 99,56% é considerado satisfatório e representa a proporção de variação na resposta que é explicada pelo modelo de regressão. O coeficiente que representa a eficiência de previsão do modelo, R² (pred.), é igual a 99,01% e está em conformidade com o coeficiente R² (aj.) igual a 99,37%, que indica a variabilidade total explicada pelo modelo de regressão após considerar as variáveis significativas. A Equação (1) representa o modelo de regressão para a rugosidade Ra, em termos das variáveis de controle.

$$Ra = 3,388 - 0,015.Vc - 3,000.f - 2,039.ap + 0,063.Vc.f + 0,008.Vc.ap + 9,240.f.ap - 0,036.Vc.f.ap \quad (1)$$

A Figura 1 ilustra os efeitos principais das variáveis de controle sobre a rugosidade R_a . Assim, é possível verificar a maior influência do avanço da ferramenta sobre a rugosidade R_a . Além disso, verifica-se o efeito positivo do avanço da ferramenta, onde o aumento do avanço promoveu o aumento da rugosidade R_a . O aumento do avanço da ferramenta de 0,12 mm/rot para 0,25 mm/rot gerou um aumento de 187% na rugosidade R_a . Singaravel *et al.* (2018) também verificaram no torneamento do aço AISI 4340 que o aumento do avanço promoveu o aumento da rugosidade R_a . Segundo os autores, isto ocorreu devido ao aumento do atrito entre o material da peça e a ferramenta de corte.

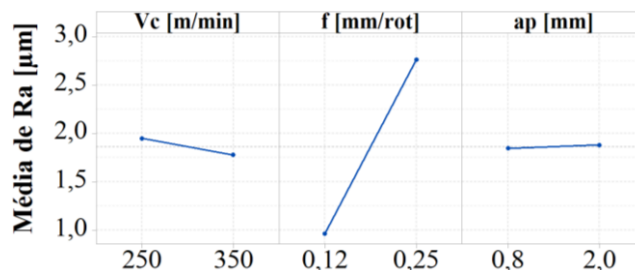


Figura 1. Efeitos principais das variáveis de controle sobre a rugosidade R_a

Ainda de acordo com a Fig. 1, é possível verificar que a velocidade de corte apresentou efeito negativo sobre a rugosidade R_a , isto é, o aumento da velocidade de corte de 250 m/min para 350 m/min promoveu uma redução de 8,7% na rugosidade R_a . O aumento da velocidade de corte eleva a temperatura na zona de corte do material, reduzindo a resistência ao cisalhamento, aumentando sua plasticidade e, possivelmente, diminuindo os esforços de corte, resultando também na redução da rugosidade. Conforme pode ser verificado na ANOVA (Tab. 3), a profundidade de corte não apresentou influência estatisticamente significativa sobre R_a .

A Figura 2 ilustra as interações duplas entre as variáveis de controle sobre a rugosidade R_a . Assim, pode-se verificar que a combinação de velocidades de corte mais altas, neste caso 350 m/min, com baixos valores de avanço e de profundidade de corte, proporcionam os menores valores de rugosidade R_a . Portanto, a melhor combinação de variáveis de controle que apresentou o menor valor de rugosidade R_a (0,640 μm) foi: velocidade de corte de 350 m/min, avanço da ferramenta de 0,12 mm/rot e profundidade de corte de 0,8 mm.

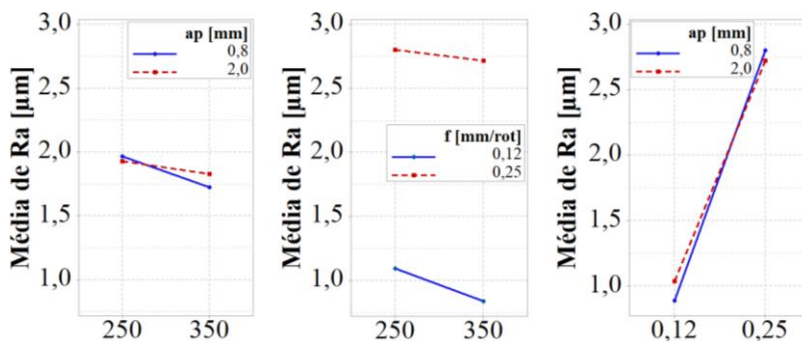


Figura 2. Interações duplas entre as variáveis de controle sobre a rugosidade R_a

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados deste trabalho, pode-se concluir que:

- A velocidade de corte e o avanço da ferramenta apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade R_a nas análises individuais;
- As interações duplas e a interação tripla entre a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte também apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade R_a ;
- O avanço da ferramenta é a variável de controle que mais influenciou na variação da rugosidade R_a , contribuindo com 97,3%;

O menor valor de rugosidade R_a obtido foi de 0,640 μm com velocidade de corte de 350 m/min, avanço da ferramenta de 0,12 mm/rot e profundidade de corte de 0,8 mm.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber Editora Ltda., São Paulo, 9ª edição.
- ISO 1302, 2002. "Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation". *International Organization for Standardization*, Switzerland, p. 46.
- Khare, S.K. e Agarwal, S., 2017. "Optimization of machining parameters in turning of AISI 4340 steel under cryogenic condition using Taguchi technique". *Procedia CIRP*, Vol. 63, p. 610-614.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e Silva, M.B., 2011. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Editora Blucher, São Paulo, 2ª edição.
- Mishra, V., Khan, G.S., Chattopadhyay, K.D., Nand, K. e Sarepaka, R.V., 2014. "Effects of tool overhang on selection of machining parameters and surface finish during diamond turning". *Measurement*, Vol. 55, p. 353-361.
- Patole, P.B. e Kulnarni, V.V., 2018a. "Parametric optimization of minimum quantity lubrication in turning of AISI 4340 using nano fluids". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, p. 12419-12425.
- Patole, P.B. e Kulnarni, V.V., 2018b. "Optimization of process parameters based on surface roughness and cutting force in MQL turning of AISI 4340 using nano fluid". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, p. 104-112.
- Rashid, W.B., Goel, S., Luo, X. e Ritchie, J., 2013. "The development of a surface defect machining method for hard turning processes". *Wear*, Vol. 302, p. 1124-1135.
- Singaravel, B., Shankar, D.P. e Prasanna, L., 2018. "Application of MCDM method for the selection of optimum process parameters in turning process". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, p. 13464-13471.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE ROUGHNESS OF AISI 4340 STEEL IN THE TURNING PROCESS

Guilherme Lopes Brandão
Pedro Márcio do Carmo Silva
Camilo Lellis dos Santos
Lincoln Cardoso Brandão

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

Étory Madrilles Arruda
João Roberto Ferreira

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

Abstract. Material removal processes are widely used in the metal-mechanical sector, where the turning is the most used process due to its flexibility in the production of mechanical components. AISI 4340 steel has great application in the metal-mechanical sector, being most often machined by the turning process. AISI 4340 steel is used in the manufacture of bearings, gears, crankshafts, cams, aircraft landing gear, tractor parts, high mechanical stresses and vehicles in general. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of the cutting parameters on the surface roughness of the AISI 4340 steel in the turning process. The tool used was a class M carbide insert and the control variables were cutting speed, feed rate, and depth of cut. The results show that, in the individual analyses, it was verified that the cutting speed and the feed rate presented a significant influence on the surface roughness in the workpiece. The two-way interactions and the three-way interaction between the input parameters also showed statistical significance on the surface roughness. It can be concluded that the feed rate was the cutting parameter that presented the most significant influence on the surface roughness.

Keywords: AISI 4340 Steel. Surface finish. Turning process.

RESPONSIBILITY NOTICE

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