

MONITORAMENTO DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 52100 UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com¹

Lincoln Maia Teixeira, lincoln.teixeira@ifmg.edu.br¹

Samuel Alves de Freitas, samuelengmec@gmail.com¹

Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹

¹ Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei, Minas Gerais

Resumo: A rugosidade dos componentes mecânicos pode influenciar diretamente nos seus tempos de vida, pois interfere na qualidade da superfície e consequentemente no atrito. Entender o comportamento da rugosidade em componentes manufaturados a partir de processos de usinagem é de grande importância, pois permite prever o resultado antes do final do trabalho, adequando assim o processo produtivo à necessidade de cada produto durante sua utilização. O aço SAE 52100 tem grande aplicação na indústria metal mecânica para a produção de componentes mecânicos, principalmente na produção de rolamentos. O objetivo foi avaliar a influência dos parâmetros de usinagem, a saber avanço da ferramenta, velocidade de corte e profundidade de corte na rugosidade, considerando os parâmetros Ra e Rz no processo de torneamento do aço SAE 52100. O material torneado estava em estado recozido e apresentava dureza de 28 HRC. Os resultados foram avaliados utilizando a técnica de Superfície de Resposta, para verificar a influência de cada parâmetro no resultado obtido. O estudo foi realizado com três ferramentas de corte com mesmas geometrias e variação apenas nos raios de ponta. Os resultados demonstraram uma influência significativa do avanço e da profundidade de corte nos valores de rugosidade. Entretanto, os resultados demonstram que é necessário o estudo de valores intermediário nos parâmetros de usinagem, permitindo compreender melhor a evolução da rugosidade para o aço SAE 52100.

Palavras-chave: Superfície de Resposta, Rugosidade, Aço SAE 52100, Acabamento

1. INTRODUÇÃO

O aço SAE 52100, popularmente conhecido como aço rolamento, é muito utilizado na indústria para a produção de componentes mecânicos para rolamentos. Durante a fabricação desses componentes, são aplicados diversos tipos de processos de fabricação, sendo o torneamento um processo de fabricação intermediário na manufatura desse tipo de aço.

De acordo com Ferraresi (1977) o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Dessa forma, o processo de torneamento possui vasta aplicação na indústria metal mecânica. Diversas são as operações possíveis de se realizar em um torno mecânico, entre elas torneamento cilíndrico interno e externo, torneamento cônico interno e externo, faceamento, perfilamento, sangramento, recartilhamento (Ferraresi, 1977 e Machado *et al.*, 2009).

A grande diversidade de tarefas que esse processo possibilita realizar utilizando apenas uma máquina, com pouca ou, algumas vezes, nenhuma etapa intermediária de *setup*, torna o processo bastante atrativo e, por tanto, justifica o fato de ser um processo bastante empregado a muito tempo. Portanto, se torna interessante e necessário, a realização de pesquisas para se entender melhor a influência de cada parâmetro envolvido durante a realização desse processo de fabricação.

Toda variação existente durante a execução do torneamento de uma peça afeta diretamente o resultado final obtido. Os parâmetros de usinagem, fluido de corte, geometria da ferramenta de corte aplicada possuem relação com o resultado obtido a partir desse processo. A rugosidade de uma peça torneada é uma resposta visual da interação de todos esses fatores envolvidos, também é de grande importância para o funcionamento de componentes mecânicos. Para a indústria de componentes de rolamentos, rugosidades elevadas podem ser muito prejudiciais.

A rugosidade de componentes usinados pode ser essencial para seu funcionamento correto, por isso recebe grande atenção de pesquisadores. Valores de rugosidade fora de padrões especificados, sejam valores maiores ou menores de rugosidade, podem resultar em mau funcionamento durante o trabalho de determinada peça ou equipamento.

Segundo Benardos e Vosniakos (2003), a rugosidade da superfície é um índice amplamente utilizado da qualidade do produto e na maioria dos casos, um requisito técnico para produtos mecânicos. Atingir a qualidade da superfície desejada é de grande importância para o comportamento funcional de uma parte.

Dessa forma, conhecer a relação entre os parâmetros de corte aplicados durante um processo de usinagem e a rugosidade obtida se torna importante e necessário. Conforme Acayaba e Escalona (2015), a fim de alcançar os valores

nominais de rugosidade superficial especificado pelo projeto de engenharia, a combinação certa de parâmetros de usinagem deve ser escolhida durante a fabricação.

Revel *et al.* (2016) estudaram a rugosidade média (Ra) durante o torneamento de alta precisão do aço SAE 52100 endurecido. Nesse trabalho os autores avaliaram a influência da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço na rugosidade média e encontraram influência dos três parâmetros na rugosidade obtida.

O material estudado no presente trabalho foi o aço SAE 52100 em estado recozido, apresentando dureza igual a 28 HRC. O objetivo do trabalho foi monitorar a rugosidade, nos parâmetros Ra e Rz, resultante do processo de torneamento do mesmo. A partir do método de superfície de resposta foi possível otimizar a rugosidade dentro da faixa estudada e definir modelos matemáticos para sua predição. Foram definidos como parâmetros de entrada o avanço da ferramenta, a profundidade de corte e velocidade de corte utilizados.

2. METODOLOGIA

No presente trabalho, o material estudado foi o aço SAE 52100 em formato de tubo com medidas de 130 mm de diâmetro externo e 100 mm de diâmetro interno. O material foi utilizado conforme recebido, portanto em estado recozido, apresentando dureza de 28 HRC. A composição química do material é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 52100 (Fonte: Autoria Própria).

Material	Valores	C	Mn	Cr	Si	P	S
Aço SAE 52100	Mínimo [%]	0,98	0,25	1,30	0,15	-	-
	Máximo [%]	1,10	0,45	1,60	0,35	0,025	0,025

O material foi cortado com 72 mm de comprimento e foram realizados canais a cada 12 mm subdividindo o material, para permitir a saída da ferramenta sem. O corpo de prova, conforme utilizado durante os experimentos, é apresentado Figura 1-a.



Figura 1. a) Corpo de Prova; b) Centro de Torneamento ROMI GL 240M. (Fonte: Autoria Própria)

A máquina utilizada para realizar os experimentos foi um centro de torneamento ROMI, modelo GL 240M que possui rotação máxima de 6000 RPM, potência máxima de 22,5 kW. Essa máquina, demonstrada na Figura 1)-b, encontra-se alocada no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ.

Para o planejamento dos experimentos realizados foi aplicado o método de superfície de resposta que é denominado como uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para o modelamento e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por várias variáveis e o objetivo é otimizar essa resposta (Montgomery, 1996), adotando o *Design Box-Behnken*. Foram utilizadas três ferramentas que possuem a mesma geometria e variação apenas nos raios de ponta, sendo elaborado um planejamento de superfície de resposta para cada raio de ponta das ferramentas, totalizando três planejamentos, e analisados separadamente.

Foram estudadas três variáveis de entrada, em três níveis cada uma, sendo essas variáveis o avanço da ferramenta, a profundidade de corte e a velocidade de corte. A escolha dos valores para as variáveis de entrada foi feita com base nas informações fornecidas, em catálogo, pelo fabricante das ferramentas, e definidos de forma que abrangessem a faixa recomendada para cada raio de ponta das ferramentas. Foram realizados 15 experimentos para cada raio de ponta estudado, totalizando 45 experimentos no trabalho. Os valores definidos para as variáveis de entrada foram demonstrados na Tabela 2.

Os experimentos foram feitos com insertos com raios de ponta de 0,4 mm; 0,8 mm e 1,2 mm. Os códigos dos insertos são TNMG 1604R-MF, sendo “R” o código equivalente ao raio de ponta da ferramenta. O porta ferramentas empregado para fixar os insertos é produzido pelo mesmo fabricante dos insertos e possui código DTJNL 2020K 16.

Tabela 2. Variáveis de entrada do processo. (Fonte: Autoria Própria)

Variáveis de Entrada	Níveis		
	-1	0	1
Avanço da Ferramenta [mm/rot]	0,050	0,175	0,300
Profundidade de Corte [mm]	0,10	1,05	2,00
Velocidade de Corte [m/min]	335	455	575

A variável resposta desse estudo foi a rugosidade, medida nos parâmetros Ra e Rz, com embasamento na norma ISO 4287/1997, por ser essa a versão da norma disponível no rugosímetro utilizado durante os experimentos.

O parâmetro de rugosidade Ra, definido como rugosidade média, é um valor médio dos valores encontrados pelo rugosímetro. O parâmetro Rz representa a média entre o valor de pico mais alto de cada comprimento de amostragem (*cut-off*) e o valor de vale mais profundo de cada comprimento de amostragem. Dessa forma, em cada *cut-off* será registrado a máxima variação de rugosidade e a rugosidade Rz será a média desses valores encontrados.

Para realizar as medições de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo Surftest SJ 400, configurado com *cut-off* igual a 0,8 mm. Para medir a rugosidade após cada experimento o corpo de prova era retirado do centro de torneamento e levado à bancada onde o rugosímetro foi montado em uma base própria para sua fixação. Em cada corpo de prova foi realizada 3 medidas de rugosidade, distanciadas a 120° entre si. Para a análise dos resultados foi considerado a média dessas 3 medidas observadas. Após realizada a medição, o corpo de prova era recolocado no centro de torneamento para a realização do próximo experimento.

3. RESULTADOS

Para avaliar os resultados obtidos foi utilizada a técnica de análise de superfície de resposta, que permite verificar se os parâmetros de corte são estatisticamente significantes no processo de torneamento do aço SAE 52100. A partir da análise realizada foi gerado uma tabela de análise de variância (ANOVA) e os resultados são demonstrados em tabelas, para cada parâmetro de rugosidade estudado, e posteriormente discutidos.

Na ANOVA o “P-valor” indica a probabilidade de cada fator influenciar a rugosidade obtida. Se o “P-valor” for menor ou igual a 0,05 é possível concluir que o efeito é significativo. O nível de significância da análise foi 95%, ou seja, 95% de probabilidade de o parâmetro ter significância no resultado encontrado, e é indicado pelo valor de referência do “P-valor” igual a 0,05 (Lauro *et al.*, 2016).

O parâmetro F, ou “relação-F”, indica o quanto cada fator influencia na variável resposta. Entre os fatores estatisticamente significantes, de acordo com o “P-valor”, o fator com maior valor na “relação-F” apresenta mais influência nas variáveis resposta, se comparado a outro valor que também foi estatisticamente significativo, porém com o valor da “relação-F” mais baixo.

Segundo a definição de Wu e Hamada (2000), o valor de R^2 (*adj*) representa a variabilidade presente nas variáveis resposta que é explicada pelas variáveis preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 100% for o valor de R^2 , melhor é a qualidade da equação ajustada dos dados (Montgomery, 2005).

As descrições dos resultados obtidos serão analisadas separadamente, primeiro a rugosidade Ra para os três raios de ponta estudados e, posteriormente, a rugosidade Rz para os mesmos três raios de ponta estudados.

3.1. Rugosidade Ra

A rugosidade Ra é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem. Portanto, a rugosidade Ra é denominada rugosidade média.

Na Tabela 3 é apresentada a ANOVA para a rugosidade Ra, obtida para os experimentos de usinagem realizados com as ferramentas que possuem raio de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm.

O valor de R^2 (*adj*) obtido na análise de variância da rugosidade Ra para as três ferramentas estudadas foram acima de 98%, o que representa que a equação ajustada dos dados reflete o comportamento experimental, portanto os modelos preditores são confiáveis.

Ao analisar os resultados da ANOVA, demonstrado na Tabela 3, é observado que o fator avanço, a relação quadrática do fator avanço e a interação dos fatores avanço e velocidade de corte foram estatisticamente significativos na rugosidade Ra para as três ferramentas estudadas.

A influência do avanço da ferramenta já foi demonstrada em outros autores como Revel *et al.* (2016), Arruda *et al.* (2015) e Ribeiro Filho *et al.* (2016) em experimentos realizados no aço SAE 52100 e em outros materiais. Autores como Thiele e Melkote (1999), Diniz *et al.* (2008) e Machado *et al.* (2009) também afirmam que a rugosidade é

diretamente proporcional ao quadrado do avanço, sendo definido em algumas situações que, quando o avanço da ferramenta aumenta a rugosidade também aumenta.

Além disso, para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm, também foram significativos os fatores de profundidade de corte, velocidade de corte e a interação do avanço com a profundidade de corte. Para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm, além dos fatores significativos já citados, também foram significativos a velocidade de corte, a relação quadrática da velocidade de corte e a relação quadrática da profundidade de corte. Ainda, para a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm também foram significativos a relação quadrática da profundidade de corte, a relação quadrática da velocidade de corte e a interação do avanço com a profundidade de corte.

Tabela 3. Análise de Variância para a rugosidade Ra (Fonte: autoria própria)

Fatores	Raio de Ponta 0,4 mm		Raio de Ponta 0,8 mm		Raio de Ponta 1,2 mm	
	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor
Avanço	2264,52	0,000	4736,12	0,000	13182,98	0,000
Profundidade de Corte	10,53	0,003	2,62	0,115	0,10	0,749
Velocidade de Corte	13,29	0,001	9,36	0,004	0,10	0,749
Avanço * Avanço	224,16	0,000	663,50	0,000	1850,59	0,000
Profundidade de Corte * Profundidade de Corte	0,36	0,553	28,31	0,000	5,03	0,031
Velocidade de Corte * Velocidade de Corte	2,19	0,148	5,01	0,032	5,13	0,030
Avanço * Profundidade de Corte	37,42	0,000	0,66	0,421	8,22	0,007
Avanço * Velocidade de Corte	41,74	0,000	10,42	0,003	4,35	0,044
Profundidade de Corte * Velocidade de Corte	1,06	0,310	0,35	0,555	2,25	0,143
	R² (adj)	98,33%	R² (adj)	99,20%	R² (adj)	99,71%

Através da análise do F-valor é possível concluir que, para as três ferramentas estudadas, os fatores que mais influenciaram nos resultados foram, respectivamente, o avanço e a relação quadrática do avanço. Através dos gráficos de contorno é possível visualizar os resultados de interação obtidos durante os experimentos realizados. Na Figura 2) são apresentados os gráficos de contorno da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm. Através dos gráficos de contorno são demonstrados a interação dos fatores avanço e profundidade de corte (gráfico a) e a interação dos fatores avanço e velocidade de corte (gráfico b).

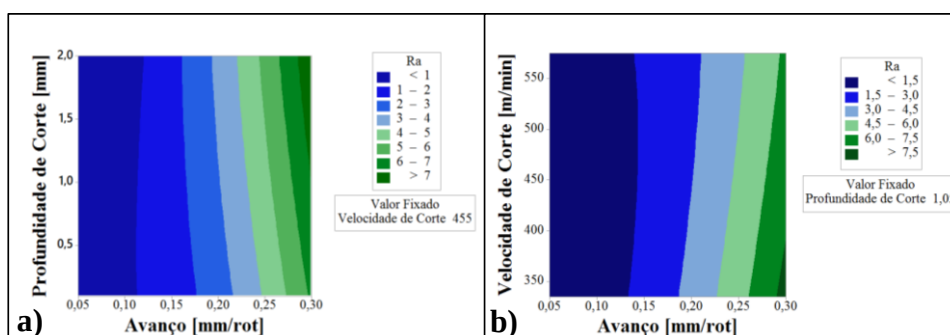


Figura 2. Gráficos de contorno da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm (Fonte: autoria própria)

A Figura 3) apresenta os gráficos de superfície para a interação entre o fator avanço e o fator profundidade de corte (a) e a interação entre o fator avanço e o fator velocidade de corte (b). Os gráficos de superfície permitem visualizar melhor o comportamento da rugosidade de acordo com a variação dos fatores envolvidos.

A partir da análise do “F-valor” na tabela de ANOVA é possível concluir que apesar de o fator profundidade corte e o fator velocidade de corte também terem sido estatisticamente significativos o fator avanço foi o que mais influenciou nos resultados de rugosidade Ra. Essa informação pode ser confirmada através dos gráficos de contorno e superfície, à medida que houve o aumento do avanço utilizado, os valores de rugosidade Ra medidos foram maiores.

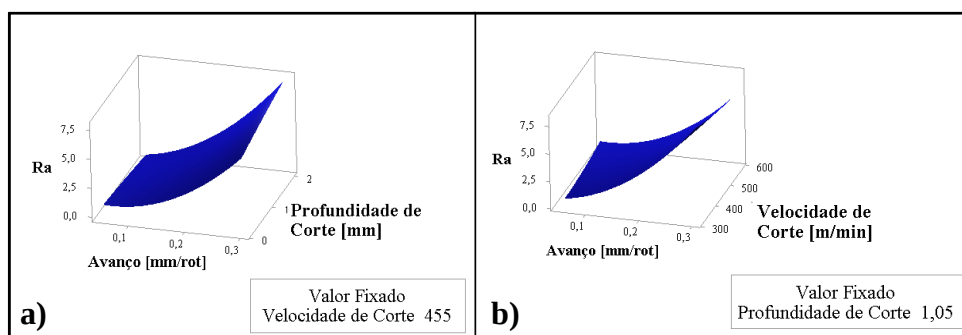


Figura 3. Gráficos de superfície da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm (Fonte: autoria própria)

A Figura 4)-a apresenta o gráfico de contorno para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm. Esse gráfico demonstra a interação entre os fatores avanço e velocidade de corte e, novamente, pode ser observado a influência dos dois fatores nos resultados obtidos, entretanto a variação do fator avanço altera mais significativamente os resultados encontrados. A Figura 4)-b apresenta o gráfico de superfície para a mesma interação, sendo possível o comportamento da rugosidade a partir da variação do fator avanço e do fator velocidade de corte. Para esse raio de ponta não foram demonstradas outras interações pois não foram estatisticamente significativas para o processo estudado.

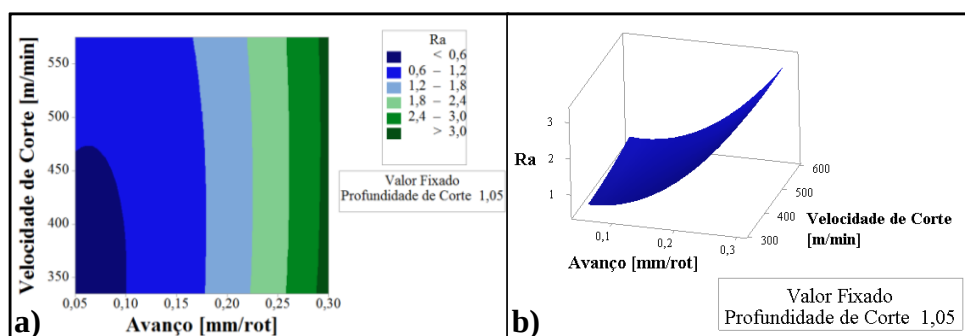


Figura 4. Gráfico de contorno (a) e gráfico de superfície (b) da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm (Fonte: autoria própria)

Na Figura 5), os gráficos de contorno demonstram a influência da interação entre os fatores avanço e profundidade de corte (gráfico a) e a influência entre os fatores avanço e velocidade de corte (gráfico b), obtidos com a ferramenta com raio de 1,2 mm

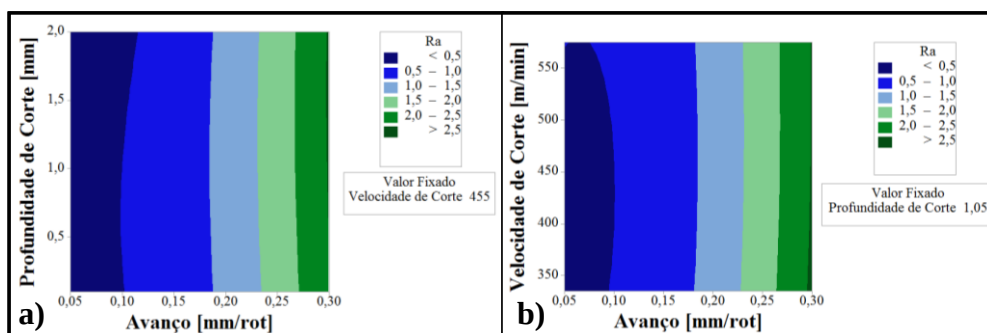


Figura 5. Gráficos de contorno da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm

A Figura 6) apresenta os gráficos de superfícies para a interação entre o fator avanço e o fator profundidade de corte (a) e a interação entre o fator avanço e o fator velocidade de corte (b), obtidos com a ferramenta com raio de 1,2 mm

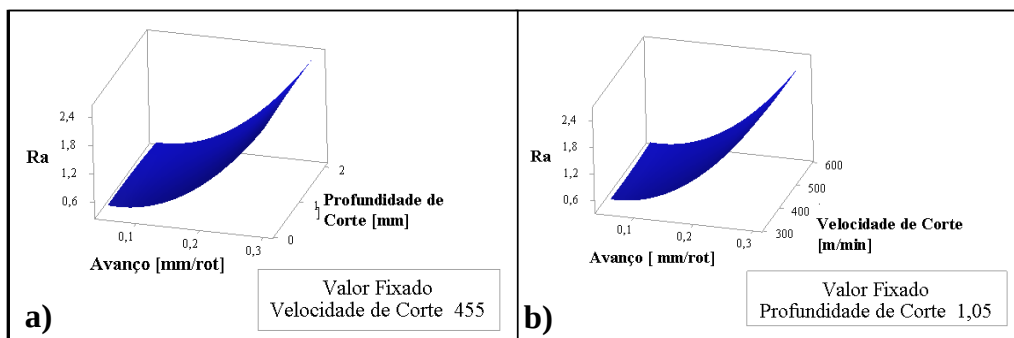


Figura 6. Gráficos de superfície da rugosidade Ra para a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm

Através da análise estatística dos resultados utilizando a metodologia de superfície de resposta foram elaborados os modelos matemáticos para as variáveis resposta estudadas. As Equações (1), (2) e (3) apresentam esses modelos referentes à rugosidade Ra para as ferramentas com raio de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm respectivamente.

$$\begin{aligned} Ra = & 0,57 + 6,02 * f - 0,101 * ap - 0,00329 * Vc + 96,87 * f^2 - 0,067 * ap^2 \\ & + 0,000010 * Vc^2 + 5,004 * f * ap - 0,04183 * f * Vc - 0,000877 * ap * Vc \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Ra = & 0,854 - 3,20 * f + 0,279 * ap - 0,00258 * Vc + 45,62 * f^2 - 0,1631 * ap^2 \\ & + 0,000004 * Vc^2 + 0,182 * f * ap - 0,00572 * f * Vc + 0,000139 * ap * Vc \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Ra = & 0,991 - 4,036 * f - 0,0641 * ap - 0,001794 * Vc + 36,649 * f^2 - 0,0331 * ap^2 \\ & + 0,000002 * Vc^2 + 0,309 * f * ap - 0,001778 * f * Vc + 0,000168 * ap * Vc \end{aligned} \quad (3)$$

Os termos f , ap e Vc da equação representam as variáveis avanço, profundidade de corte e velocidade de corte respectivamente. Como os valores de R^2 (adj.) calculados para a rugosidade Ra, e apresentados na ANOVA, foram todos próximos de 100%, o que representam que o modelo de predição é confiável, as equações descritas acima podem ser utilizadas para predições dos valores de rugosidade média (parâmetro Ra).

3.2. Rugosidade Rz

De acordo com a norma ISO 4287/2002, que é a versão da norma que está em uso atualmente, a rugosidade Rz é definida como a soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v , no comprimento de amostragem. Na própria norma a rugosidade Rz é denominada altura máxima do perfil. No entanto, no conteúdo da norma há uma nota alertando que em edições anteriores da norma o símbolo Rz era utilizado para indicar a altura das irregularidades sobre dez pontos, e não apenas o ponto mais alto e o ponto mais baixo conforme a edição de 2002 em diante.

Perante o descrito anteriormente e avaliando o fato de que o rugosímetro utilizado realiza as medições com base na versão de 1997 da norma em questão, é possível concluir que as medições apresentadas no presente trabalho não se tratam da altura máxima do perfil e sim de uma média das alturas máximas do perfil, o que não invalida os resultados obtidos mas exige cuidado ao se comparar esses resultados com trabalhos futuros.

Na Tabela 4 é apresentada a análise de variância para a rugosidade Rz, obtida para os experimentos de usinagem realizados com as ferramentas classe 4315 com raio de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm.

O valor de R^2 (adj) obtido na análise de variância da rugosidade Rz para as três ferramentas estudadas foram acima de 98%, o que representa que a equação ajustada dos dados reflete o comportamento experimental, portanto os modelos preditores são confiáveis.

A análise dos resultados da ANOVA para a rugosidade Rz permite observar que, assim como na rugosidade Ra, o fator avanço e a relação quadrática do avanço foram estatisticamente significativos. Entretanto, a interação dos fatores avanço e velocidade de corte apresentou influência apenas para as ferramentas de raio de ponta de 0,4 mm e 0,8 mm.

Da mesma forma que já citado para a rugosidade Ra, a influência do avanço da ferramenta na rugosidade Rz já foi demonstrada por outros autores como Arruda et al. (2015) e Ribeiro Filho (2016) em experimentos com outros materiais. Thiele e Melkote (1999), Diniz et al (2008) e Machado et al (2009) afirmam que a rugosidade é diretamente proporcional ao quadrado do avanço, quando o avanço da ferramenta aumenta a rugosidade também aumenta.

Tabela 4. Análise de Variância para a rugosidade Rz (Fonte: autoria própria)

Fatores	Raio de Ponta 0,4 mm		Raio de Ponta 0,8 mm		Raio de Ponta 1,2 mm	
	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor
Avanço	2936,40	0,000	3416,17	0,000	8164,91	0,000
Profundidade de Corte	8,78	0,005	6,01	0,019	0,04	0,846
Velocidade de Corte	13,60	0,001	5,55	0,024	0,96	0,334
Avanço * Avanço	351,84	0,000	725,84	0,000	1574,67	0,000
Profundidade de Corte * Profundidade de Corte	0,03	0,871	12,56	0,001	7,09	0,012
Velocidade de Corte * Velocidade de Corte	0,01	0,917	9,71	0,004	11,99	0,001
Avanço * Profundidade de Corte	45,57	0,000	1,14	0,293	19,67	0,000
Avanço * Velocidade de Corte	37,77	0,000	19,36	0,000	2,77	0,105
Profundidade de Corte * Velocidade de Corte	0,63	0,434	0,64	0,429	8164,91	0,000
	R²	98,72 %	R²	98,96 %	R²	99,55 %

Além dos fatores estatisticamente significativos já citados para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm, é possível observar também a influência nos resultados de rugosidade Rz para os fatores profundidade de corte, velocidade de corte e a interação entre os fatores avanço e profundidade de corte.

Para a ferramenta com raio de ponta 0,8 mm, também foram significativos os fatores profundidade de corte, velocidade de corte, a relação quadrática da profundidade de corte e a relação quadrática da velocidade de corte.

Os resultados de rugosidade Rz obtidos com a ferramenta de raio de ponta com 1,2 mm também foram influenciados pela relação quadrática da profundidade de corte, pela relação quadrática da velocidade de corte e pela interação entre os fatores avanço e profundidade de corte.

Da mesma forma que observado para a rugosidade Ra, a análise do “F-valor” na ANOVA para a rugosidade Rz permite concluir que o fator avanço e a relação quadrática do avanço foram os fatores que mais influenciaram nos resultados obtidos durante os experimentos.

Na Figura 7) são apresentados os gráficos de contorno para a interação entre os fatores avanço e profundidade de corte (a) e a interação entre os fatores avanço e velocidade de corte (b). Essas foram as condições de interação que forma estatisticamente significativas durante o processo para os experimentos realizados com a ferramenta de raio 0,4 mm.

A partir da análise dos gráficos fica evidenciado a influência dos fatores no resultado de rugosidade Rz, assim como observado na tabela de ANOVA.

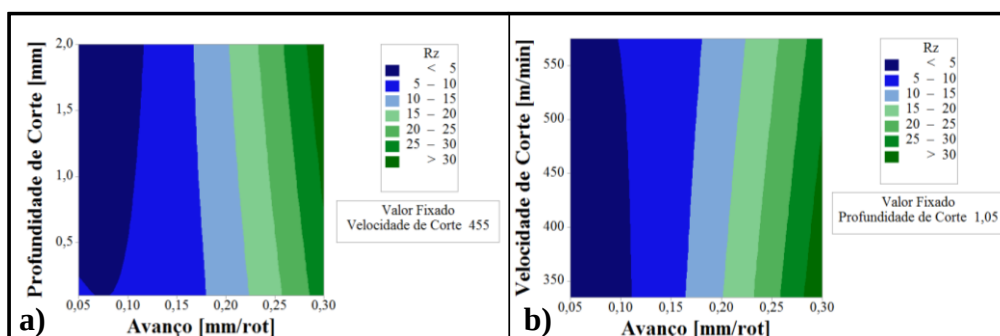


Figura 7. Gráficos de contorno da rugosidade Rz para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm

A Figura 8) apresenta os gráficos de superfície para a interação entre os fatores avanço e profundidade de corte (a) e a interação entre os fatores avanço e velocidade de corte, onde é possível visualizar melhor o comportamento da rugosidade Rz de acordo com a variação dos fatores.

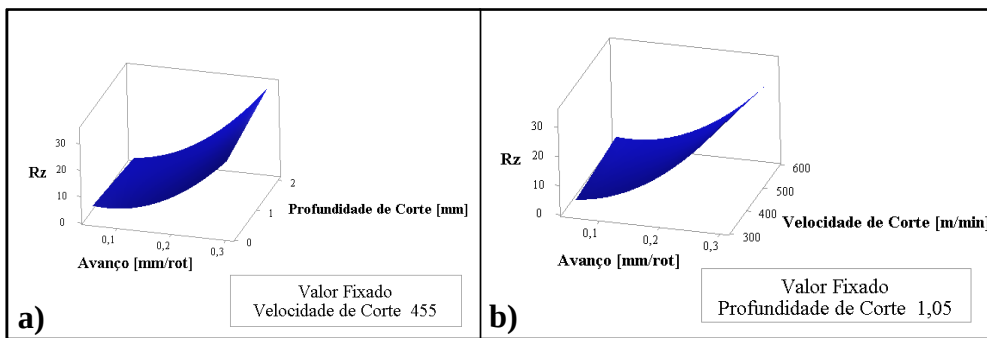


Figura 8. Gráficos de superfície da rugosidade Rz para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm

A partir do “F-valor”, contido na tabela de ANOVA é possível concluir que o fator avanço é o fator que mais influencia o resultado da rugosidade Rz. Os gráficos de contorno e superfície permitem visualizar a maior influência da alteração do avanço no resultado final da rugosidade Rz

A Figura 9)-a apresenta o gráfico de contorno para a interação entre os fatores avanço e velocidade de corte para os experimentos realizados com a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm, onde fica claro a influência da velocidade de corte e do avanço nos resultados.

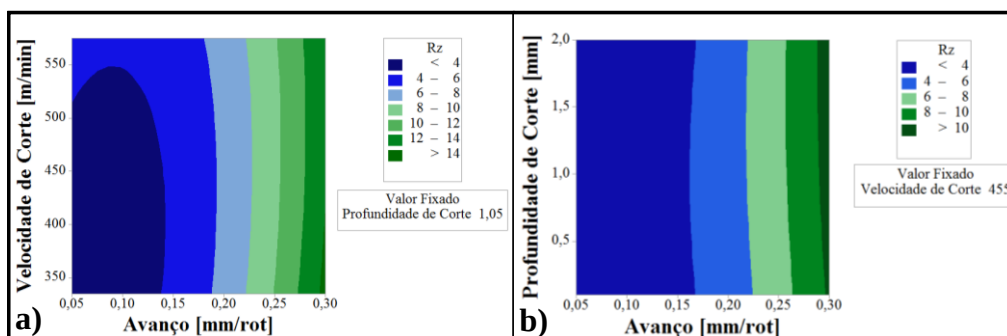


Figura 9. Gráficos de contorno da rugosidade Rz. a) Ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm. b) Ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm

Na Figura 9)-b é apresentado o gráfico de contorno para a interação entre os fatores avanço e profundidade de corte para os experimentos realizados com a ferramenta que possui raio de ponta de 1,2 mm. Novamente é possível observar a influência do avanço nos resultados, já a variação da profundidade de corte apresenta pequenas variações na rugosidade Rz, entretanto essas variações não foram estatisticamente significativas de acordo com a ANOVA realizada. Na Figura 10) são apresentados os gráficos de superfície da rugosidade Rz para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm (a) e para a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm (b).

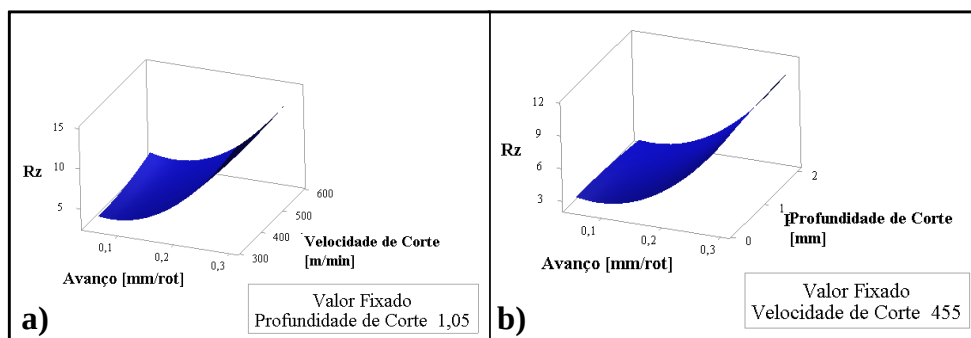


Figura 10. Gráficos de superfície da rugosidade Rz. a) Ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm. b) Ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm

Através da análise estatística dos resultados utilizando a metodologia de superfície de resposta foram elaborados os modelos matemáticos para as variáveis resposta estudadas. As Equações (4), (5) e (6) apresentam esses modelos referentes à rugosidade R_z para as ferramentas com raio de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm respectivamente.

$$R_z = -1,08 - 1,5 * f - 1,50 * ap + 0,0180 * V_c + 447,3 * f^2 - 0,068 * ap^2 + 0,000003 * V_c^2 + 20,35 * f * ap - 0,1467 * f * V_c - 0,00249 * ap * V_c \quad (4)$$

$$R_z = 6,77 - 21,69 * f + 0,705 * ap - 0,01840 * V_c + 224,36 * f^2 - 0,511 * ap^2 + 0,000028 * V_c^2 + 1,12 * f * ap - 0,03667 * f * V_c + 0,00088 * ap * V_c \quad (5)$$

$$R_z = 8,348 - 30,28 * f - 0,462 * ap - 0,01628 * V_c + 158,93 * f^2 - 0,1847 * ap^2 + 0,000015 * V_c^2 + 2,246 * f * ap - 0,00667 * f * V_c + 0,001023 * ap * V_c \quad (6)$$

Visto que os valores de R^2 (adj.) calculados para a rugosidade R_z , e apresentados na ANOVA, foram todos próximos de 100%, o que representam que o modelo de predição é confiável, as equações descritas acima podem ser utilizadas para predições dos valores de rugosidade R_z .

3.2.1. Otimização dos resultados

Após a análise dos resultados obtidos foi realizado a otimização dos resultados, que considera os modelos de predição calculados, para que seja possível estimar a combinação de parâmetros que resulta nos menores valores de rugosidades. As combinações estimadas, que proporcionam os menores valores de rugosidade, para cada raio de ponta utilizado, foram:

- Raio de ponta de 0,4 mm: Avanço 0,05 mm/rot; Profundidade de corte 2 mm; Velocidade de corte: 335 m/min;
- Raio de ponta de 0,8 mm: Avanço 0,0626 mm/rot; Profundidade de corte 2 mm; Velocidade de corte: 335 m/min;
- Raio de ponta de 1,2 mm: Avanço 0,0652 mm/rot; Profundidade de corte 2 mm; Velocidade de corte: 429,55 m/min;

4. CONCLUSÕES

No estudo de monitoramento da rugosidade no torneamento do aço SAE 52100 aplicando a metodologia de superfície de resposta apresentado, foram aplicados como fatores de entrada os parâmetros de usinagem avanço da ferramenta, profundidade de corte e velocidade de corte empregando ferramentas de corte com raio de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm.

A partir do estudo experimental e da análise estatística dos resultados foi possível determinar a influência dos parâmetros estudados nas respostas de rugosidade R_a e rugosidade R_z .

Para a rugosidade R_a o fator avanço foi estatisticamente significativo quando utilizadas as ferramentas com os três raios de ponta estudados. O fator velocidade de corte foi estatisticamente significativo somente para as ferramentas com raio de ponta 0,4 mm e 0,8 mm. Já a profundidade de corte apresentou influência significativa nos resultados quando foi empregada a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm.

Para a rugosidade R_z o fator avanço foi estatisticamente significativo quando utilizadas as ferramentas com os três raios de ponta estudados. O fator velocidade de corte foi estatisticamente significativo somente para as ferramentas com raio de ponta 0,4 mm e 0,8 mm., assim como o fator profundidade de corte influenciou significativamente os resultados apenas para as ferramentas com raio de ponta de 0,4 mm e 0,8 mm.

No presente trabalho foi elaborado também, a partir da análise estatística dos resultados, modelos matemáticos de predição que permitem obter uma previsão dos resultados finais de trabalho antes mesmo que o trabalho prático seja realizado, com o objetivo de diminuir etapas de teste e preparação durante o processo produtivo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação no COBEF 2017 e a empresa Vallourec Tubos do Brasil pela doação do material de consumo.

6. REFERÊNCIAS

Acayaba, G.M.A., Escalona, P.M., 2015, "Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 11, pp. 62-67.

- Arruda, E.M., Svork Júnior, J., Brandão, L.C., 2015, “Análise dos esforços de corte e da qualidade superficial no torneamento com alta velocidade de corte do aço API 5L X70”, 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Bahia, Brasil.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 1997.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- Benardos, P.G.; Vosniakos G.-C., 2003, “Predicting surface roughness in machining: a review”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 833-844.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2008, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Ed. Art Liber Ltda., 6ª Ed., São Paulo, Brasil, 262 p.
- Ferraresi, D, 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751 p.
- Lauro, C. H.; Ribeiro Filho, S. L. M.; Baldo, D.; Cerqueira, S. A. A. G.; Brandão, L. C., 2016 “Optimization of micro milling of hardened steel with different grain sizes using multi-objective evolutionary algorithm”, Measurement, Vol. 85, pp. 88-99.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 371 p.
- Montgomery, D. C., 1996. “Design and analysis of experiments”. 4a edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
- Montgomery, D. C., 2005. “Design and analysis of experiments”. 6a edition. Arizonac.: John Wiley & Sons, Inc.
- Revel, P., Jouini, N., Thoquenne, G., Lefebvre, F., 2016, “High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel”, Precision Engineering, Vol. 43, pp. 24-33.
- Ribeiro Filho, S.L.M., Lauro, C.H., Bueno, A.H.S., Brandão, L.C., 2016 “Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method”, Measurement, Vol. 88, pp. 223-237.
- Thiele, J. D., Melkote, S. N., 1999, “Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 94, pp. 216-226.
- Wu C. F. J., Hamada M., 2000. Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization New York: John Wiley & Sons.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MONITORING OF SURFACE ROUGHNESS IN THE TURNING OF SAE 52100 STEEL USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com¹
Lincoln Maia Teixeira, lincoln.teixeira@ifmg.edu.br¹
Samuel Alves de Freitas, samuelengmec@gmail.com¹
Wasley Amaral Coelho, wasleyamaral@hotmail.com¹
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.edu.br¹

¹Federal University of São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del Rei, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. The surface roughness of the mechanical components can directly influence in their life times, because it interferes in the quality of surface and consequently the friction. Understanding the behavior of surface roughness in manufactured components from machining processes is of great importance because it allows predicting the outcome before the end of the work, so adapting the production process to the needs of each product during use. The SAE 52100 steel that has great application in the metalworking industry for the production of mechanical components, mainly in the production of ball bearings. The objective was to evaluate the influence of machining parameters, namely feed rate, cutting speed, and depth of cut on the surface roughness considering the Ra and Rz parameters in the turning of SAE 52100 steel. The results were evaluated using the Response Surface Methodology to determine the influence of each parameter on the result. The study was performed using three cutting tools with the same geometries and changing only in the nose radius. The results show a significant influence of feed rate and cutting depth in the surface roughness values. However, the study results demonstrate that intermediate values of the cutting parameters is required, allowing better understand the evolution of the surface roughness for SAE 52100 steel.

Keywords: Response Surface, Roughness Surface, SAE 52100 steel, Finish Turning