

Análise dos microerros no torneamento externo do aço 4340 considerando o comprimento de fixação das peças**Analisis of microerrors in external turning of the 4340 steel considering the overhang of the workpieces**

DOI:10.34117/bjdv5n6-138

Recebimento dos originais: 27/04/2019

Aceitação para publicação: 06/05/2019

Guilherme Lopes Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC); Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS);Praça Frei Orlando, 170
- Centro

E-mail: gui.lopes.brandao@gmail.com

Pedro Márcio do Carmo Silva

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC); Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS);Praça Frei Orlando, 170
- Centro

E-mail: pmcs_sjdr@hotmail.com

Jessica Tito Vieira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC); Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS);Praça Frei Orlando, 170
- Centro

E-mail: jessica.tito@hotmail.com

Camilo Lellis dos Santos

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC); Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS);Praça Frei Orlando, 170
- Centro

E-mail: camilo_santos@ufs.edu.br

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC); Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS);Praça Frei Orlando, 170
- Centro

E-mail: lincoln@ufs.edu.br

RESUMO

Os processos de remoção de material são amplamente empregados nas indústrias e todo componente mecânico tem pelo menos uma etapa de fabricação onde a modificação da geometria ocorre por geração de cavaco. Neste trabalho corpos de prova tubulares de aço 4340 com dureza de 32 HRC, 36 milímetros de diâmetro externo, 24 milímetros de diâmetro interno e comprimento de 40 milímetros foram torneados externamente. O balanço e o diâmetro dos corpos de prova foram mantidos constantes, variando-se apenas os valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Além disso foram realizados

experimentos com e sem a utilização do contraponto rotativo e variada a direção de corte. Como resposta foram usados os valores da rugosidade R_a e o erro de cilíndricidade R_{on} , no começo e no final do corpo de prova. Pode-se concluir que os melhores valores de rugosidade R_a foram obtidos com o uso de contraponto para as medições realizadas na região mais próxima de fixação dos corpos de prova. Da mesma forma, os menores valores de erro de circularidade foram obtidos também na região mais próxima da fixação dos corpos de prova.

Palavras-Chave: Rugosidade R_a , Torneamento, Balanço dos corpos de prova, Análise de variância.

ABSTRACT

Material removal processes are widely used in industries and all mechanical component has at least a production stage where the geometric change occurs by chip generation. In this work 4340 steel tubes with hardness of 32 HRC, 36 mm of external diameter, 24 mm of internal diameter and length of 40 mm were turning externally. The overhang and diameter of the workpieces were kept constant, with only the values of cutting speed, feed rate, and depth of cut. In addition, experiments were performed with and without tailstock and varied the cutting direction. The surface roughness values R_a and the R_{on} roundness error at the beginning and at the end of the workpieces were used as response. It can be concluded that the best values of surface roughness R_a were obtained with the use of tailstock for the measurements carried out in the region closest to the fixation of the workpieces. Likewise, the lowest values of roundness error were also obtained in the region closest to the fixation of the workpieces.

Key- Words: Surface roughness R_a , Turning, Overhang of workpieces, Analysis of Variance.

1 INTRODUÇÃO

Os processos que utilizam a remoção de material são amplamente empregados no setor metal-mecânico das indústrias brasileiras. Todo componente mecânico tem, no mínimo, uma etapa de fabricação onde a transformação de material ocorre por retirada de material na forma de cavaco. Entre os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material, o processo de torneamento é o mais empregado devido a sua flexibilidade na produção de componentes mecânicos, permitindo fabricar peças com uma enorme variedade de geometrias.

Na indústria moderna a busca por melhoria da qualidade é contínua e, basicamente, depende da otimização das variáveis dos processos de fabricação. Segundo Mishra et al. (2014), nos processos de manufatura de precisão, a fase de acabamento é a etapa de mais crítica e mais cara de todo o processo. Isto ocorre pelo fato do nível micrométrico de acabamento superficial que é exigido nos componentes mecânicos de peças aeronáuticas, automotivas e biocomponentes. Ainda segundo os autores, a maioria das operações de

acabamento tradicionais depende do talento dos operadores gerando nas formas finais uma faixa de valores de microerros de forma que determinam o padrão de qualidade.

Entre os microerros, a rugosidade e a circularidade são os principais parâmetros de orientação e controle de qualidade em componentes superficiais quando se considera as exigências de acabamento superficial e detalhes de montagem de componentes. A rugosidade pode ser definida em vários padrões de medição, sendo os principais os parâmetros Ra, Rz e Ry. Cada um destes parâmetros apresenta uma especificidade de medição e quando comparados os valores medidos são distintos. Cada um destes parâmetros de medição é empregado para avaliar uma superfície considerando não apenas a aspereza da superfície, mas também a forma geométrica que está sendo medida.

Por outro lado, a circularidade compreende um cilindro de referência que é definido pela soma dos quadrados das distâncias radiais, o qual é considerado como um dos cilindros de referência mais estável. O valor de cilindridade com base no cilindro dos mínimos quadrados é dado pela soma do maior pico com o maior vale entre os vários planos considerados em cada altura medida da peça.

Pode-se considerar que os valores de rugosidade e circularidade são influenciados em primeiro plano pelos parâmetros de usinagem. A definição incorreta dos parâmetros de corte pode levar a condições de acabamento indesejáveis em todos os tipos de processos de fabricação com remoção de material (FERRARESI, 1990). A seleção correta dos parâmetros de usinagem no processo de torneamento evita em alguns casos o surgimento de problemas secundários como vibrações no processo. A vibração em processos de torneamento é o grande responsável pela baixa qualidade superficial dos componentes mecânicos podendo comprometer inclusive a montagem destes componentes.

Considerando as geometrias possíveis na fabricação de componentes mecânicos, peças com elevado índice de esbeltez são as mais complexas de serem fabricadas. Dessa forma, definir o índice de esbeltez de um componente mecânico é extremamente difícil, pois a relação entre o diâmetro do componente e o seu comprimento ainda depende da experiência prévia dos operadores de máquina não havendo nenhuma formulação específica a ser empregada. A solução mais simples adotada é o uso do contraponto rotativo como ponto de apoio na região oposta a fixação realizada nas castanhas do torno.

Entretanto, em alguns casos, mesmo com o uso do contraponto rotativo percebe-se que a solução é parcial, pois não se consegue eliminar por completo a vibração da peça durante o processo de torneamento. Abouelatta e Mádl (2001) estabeleceram uma relação entre a vida

das ferramentas, rugosidade e vibração do processo. Os autores selecionaram como variáveis de processo o balanço, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, raio de ponta e corpos de prova com diferentes diâmetros. Eles mediram a aceleração no sentido radial e axial do processo de torneamento e usaram uma transformada rápida de Fourier para analisar os resultados.

Mishra et al. (2014) desenvolveram um estudo com ênfase na influência do balanço da ferramenta sobre a rugosidade das peças torneadas. Segundo os autores os comprimentos ideais de balanço estão na faixa de 12 a 16 mm. Dilwar e Siddique (2018) também estudaram o balanço de pelas torneadas. A amplitude de vibração no torneamento do aço inoxidável 304 foi utilizada como resposta. Os autores concluíram que os menores resultados de vibração no processo foram obtidos com balanços menores que 35 mm, velocidade de corte de 50 m/min e avanço de 0,20 mm/rev.

Patwari et al. (2018) também estudaram a influencia do comprimento em balanço de peças torneadas na rugosidade e na morfologia do cavaco. Segundo os autores, o desenvolvimento industrial exige determinar o valor exato de velocidade de corte e avanço permitindo aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade dos componentes usinados. Os melhores valores de rugosidade foram obtidos com a relação de comprimentos de balanço de 40 milímetros e os piores valores de rugosidade foram obtidos com comprimento de balanço de 60 milímetros.

Bandaso e Leonard (2015) estudaram a influência do comprimento em balanço de peças de aço carbono SAE 1060 com ferramentas de aço rápida na vibração do processo e nos resultados de rugosidade no parâmetro Ra. Os resultados demonstraram que o avanço, a velocidade de corte e dimensão das ferramentas foram nesta ordem os principais responsáveis pelo aumento ou redução da vibração no processo. Segundo os autores quanto menor a dimensão do suporte maior o valor de vibração do processo e maior o valor de rugosidade encontrado. Os melhores valores de rugosidade foram encontrados com os maiores valores de velocidade de corte e avanços intermediários.

Considerando o erro de circularidade, observa-se também uma grande preocupação com a vibração de processo e sua influência neste tipo de erro. Autores como Cho e Tu (2001) estudaram a variação do erro de circularidade com base no efeito dos harmônicos gerados pela rotação do eixo árvore. A modelagem encontrada pelos autores demonstrou-se robusta não apenas para o processo de torneamento, mas também para o processo de retificação. Por outro lado, Choi et al. (2003) estudaram os erros de circularidade no processo de furação

realizado em centros de usinagem considerando a deflexão da ferramenta. O modelo proposto pelos autores foi capaz de prever os erros de circularidade não sendo restrito a apenas a uma interpolação planar circular, mas aplicável a vários tipos de erros de forma.

Bianca et al. (2008) demonstram que a análise estatística dos erros de circularidade é de grande importância para o processo de torneamento. Os autores desenvolveram uma nova abordagem, diferente das tradicionais cartas de controle univariadas, que se apresentam como solução ideal, porém, são ineficientes para prever falta de controle de parâmetros externos. Segundo os autores o método desenvolvido permite uma aproximação mais precisa entre o controle de qualidade e o monitoramento dos perfis de peças usinadas considerando as exigências das especificações geométricas.

Portanto, pode-se observar com base nas informações dos trabalhos citados que o acabamento de peças torneadas está diretamente ligado a rigidez do sistema de fixação, balanço da peça e parâmetros de corte, precisando para cada situação específica de usinagem um estudo prévio das variáveis de entrada como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte com o objetivo de minimizar a rugosidade e o erro de circularidade, otimizando, dessa forma, a qualidade dos componentes fabricados pelo processo de torneamento.

2 METODOLOGIA

Testes experimentais foram realizados no laboratório de processos de fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC da Universidade Federal de São João del-Rei. Corpos de prova de aço SAE 4340 em formato tubular com dureza de 32 HRC e dimensões de 36 milímetros de diâmetro externo, 24 milímetros de diâmetro interno e comprimento de 40 milímetros foram usinados em um centro de torneamento marca Romi modelo GL-240-M. Os corpos de prova foram fixados em um suporte específico para que fosse possível manter a usinagem em um comprimento máximo de balanço em 2,5 vezes o diâmetro do corpo de prova e, ao mesmo tempo, permitir apoio do contraponto rotativo da máquina. Neste trabalho o balanço dos corpos de prova foi mantido constante assim como o diâmetro dos corpos de prova, variando-se apenas os valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Entretanto, em todas as condições a relação diâmetro/comprimento do corpo de prova foi mantida constante. A Figura 1 mostra o *setup* dos experimentos.

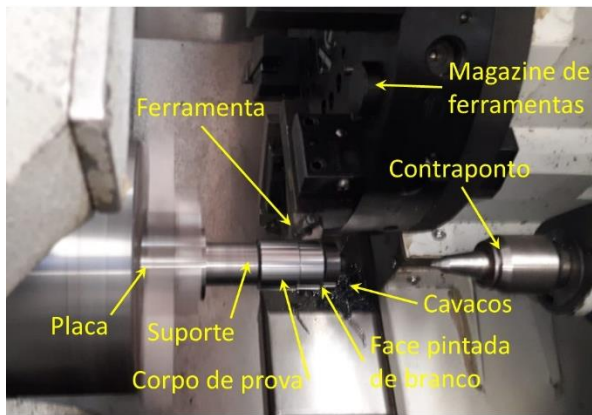


FIGURA 1. Montagem dos corpos de prova no processo de torneamento (Fonte: Autoria própria).

A Tabela 1 mostra as variáveis com seus respectivos níveis empregadas nos testes experimentais. Como variáveis contínuas foram variadas a velocidade de corte, o avanço e profundidade de corte e como variáveis discretas foram utilizados o sentido de usinagem variando-se o torneamento da placa para o contraponto e do contraponto para a placa. Além disso, foram realizados teste experimentais com e sem o apoio do contraponto rotativo da máquina.

TABELA 1. Variáveis de entrada e seus respectivos níveis (Fonte: autoria própria)

Parâmetros	Níveis	
	-1	+1
Velocidade de corte [m/min]	250	350
Avanço [m/rev]	0,12	0,25
Profundidade de corte [mm]	0,8	2,0
Direção de corte [adm]	Placa	Ponto
Fixação [adm]	Com contraponto	Sem contraponto

Como resposta foi empregado o valor da rugosidade R_a no começo e no final do corpo de prova e o valor de circularidade codificado como R_{on} . Foram realizadas três medidas nas extremidades dos corpos de prova equidistantes entre si 120° . As medidas de rugosidade foram realizadas utilizando um perfilômetro da marca Taylor Hobson modelo C131 com cut-off de 0,8 milímetros e as medidas de circularidade foram medidas em um medidor de circularidade modelo Form TalysurfIntra também da empresa Taylor Hobson. Os corpos de

prova foram identificados de maneira que a face voltada para o contraponto estivesse pintada na cor branca, sendo esta identificada para informar o ponto mais distante da fixação, e denominada neste trabalho de FACE A. A outra face mais próxima das castanhas de fixação foi denominada de FACE B. A Figura 2(a) mostra o setup para medição dos valores de rugosidade Ra e a Figura 2(b) mostra o processo de medição de circularidade.

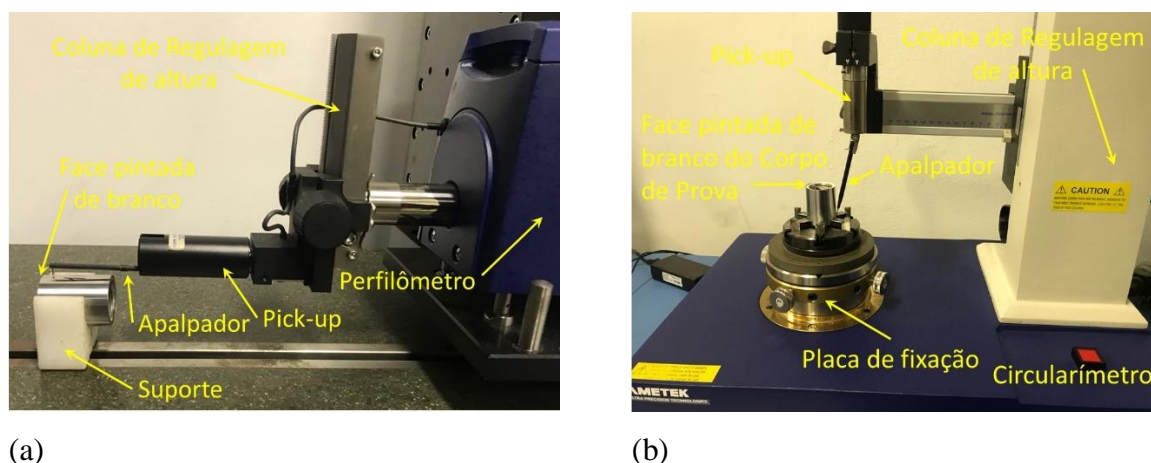


FIGURA 2. (a) Fixação para medição dos valores de rugosidade Ra e (b) montagem para medição dos valores de circularidade (Fonte: autoria própria).

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DE RUGOSIDADE RA

A Tabela 2exibe a análise de variância com o resultado do P-valor para os parâmetros de entrada, a saber, variáveis de corte, direção de usinagem e condição de fixação. Pode-se considerar que o P-valor corresponde a probabilidade de serem observados valores da estatística de teste maiores ou iguais aos valores encontrados. Assim, o valor de corte para rejeitar a hipótese nula, onde não existe nenhuma diferença estatística entre os grupos é de 0,05 (5%), isto significa que quando não existe nenhuma diferença, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5% das vezes (Wu e Hamada, 2009; Montgomery, 2017).As variáveis de corte foram a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, estes parâmetros são considerados contínuos, pois podem ter uma variação constante. Por outro lado, direção de usinagem e condição de fixação são parâmetros discretos pelo fato de não apresentarem uma variação contínua e sendo pontos fixos no experimento.

Na Tabela 2 observa-se que todas as variáveis de entrada, tais como os parâmetros de corte, direção de usinagem e condição de fixação tiveram influência na variação da

rugosidade Ra no início do corpo de prova, considerando-se os efeitos principais. Por outro lado, no final do corpo de prova apenas a velocidade de corte não apresentou P-valor abaixo de 5% não demonstrando, portanto, influencia na variação da rugosidade Ra.

As Figura 3 e 4 mostram os gráficos de efeito principais para variáveis de entrada; velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, direção e fixação. Na Figura 3 é apresentado o comportamento das variáveis de entrada para valores médios de rugosidade Ra no início do corpo de prova e na Figura 4 são os valores médios de rugosidade Ra para as medições no final do corpo de prova. Para os valores de rugosidade Ra no início do corpo de prova o menor valor obtido foi de 1,863 micrometros com contraponto e o maior valor foi de 3,351 micrometros sem contraponto, sendo ambos valores ocorrendo na alteração do sistema de fixação. Por outro lado, considerando as medidas de rugosidade Ra realizadas no final do corpo de prova, o menor valor foi de 1,877 micrometros com o uso do contraponto e o maior valor de 3,942 micrometros sem o uso do contraponto, sendo também ambos os valores de rugosidade Ra registrados com a variação do sistema de fixação.

TABELA 2. Análise de Variância (ANOVA) para os valores de rugosidade Ra e Circularidade R_{ont} (Fonte: autoria própria)

Fonte	Ra – Início		Ra – Final		Ront – Início		Ront – Final	
	F-Valor	P-Valor	F-Valor	P-Valor	F-Valor	P-Valor	F-Valor	P-Valor
Vel. de corte	60,3	0,000	0,06	0,806	0,04	0,844	302,85	0,000
Avanço	110,7	0,000	9,16	0,004	5,32	0,008	77,41	0,000
Prof. de corte	36,95	0,000	26,34	0,000	7,62	0,000	157,26	0,000
Direção	166,13	0,000	479,47	0,000	15,61	0,957	447,84	0,000
Fixação	614,49	0,000	651,03	0,000	0,00	0,844	207,65	0,000
Regressão	Ra – Início		$R^2 = 97,4\%$		$R^2(\text{Adj.}) = 96,0\%$		$R^2(\text{Prev.}) = 93,7\%$	
	Ra – Final		$R^2 = 97,9\%$		$R^2(\text{Adj.}) = 96,8\%$		$R^2(\text{Prev.}) = 95,0\%$	
	Ront - Início		$R^2 = 87,6\%$		$R^2(\text{Pre.}) = 81,0\%$		$R^2(\text{Prev.}) = 70,4\%$	
	Ront - Final		$R^2 = 98,4\%$		$R^2(\text{Prev.}) = 95,6\%$		$R^2(\text{Prev.}) = 96,2\%$	

Observa-se que a variação dos valores de avanço, profundidade de corte e sistema de fixação tiveram comportamento similares com aumento dos valores de rugosidade Ra proporcionais ao aumento dos parâmetros de processo, nas duas regiões de medição da rugosidade, início e final do corpo de prova. Por outro lado, a direção de corte apresentou um comportamento oposto nas duas regiões de medição de rugosidade Ra e velocidade de corte teve influencia apenas nas medições realizadas no início do corpo de prova.

A variação dos valores de velocidade de corte tem pequena influência na variação da rugosidade Ra, pois nota-se que para as medidas de rugosidade Ra no início do corpo de prova o valor médio foi 2,6 micrometros (linha média) e o decréscimo foi de 19,63%. Pode-se afirmar que isto ocorreu, em primeiro lugar, pelo fato da velocidade de corte estar mais relacionada com os esforços de corte no processo de torneamento do que com os valores de acabamento do corpo de prova e em segundo lugar pelo fato da velocidade de corte ser o parâmetro de processo responsável pelo aumento da vibração em sistemas rotativos, sendo estas vibrações geralmente maiores nos pontos mais distantes das fixações, mas dependendo do parâmetro empregado pode-se melhorar a estabilidade do processo de usinagem diminuindo o valor de rugosidade. Porém, na Figura 3 o maior valor de rugosidade Ra encontrado foi de 2,84 micrometros, medido no início do corpo de prova, e para as medidas no final do corpo o menor valor foi de 2,9 micrometros, demonstrando que mesmo assim a velocidade de corte apresentou uma pequena variação nos valores da rugosidade Ra.

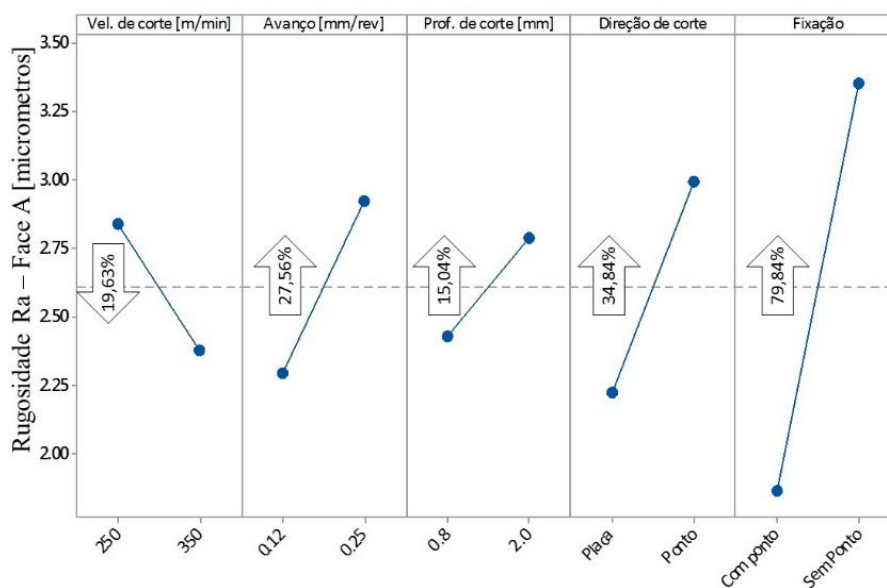


FIGURA 3. Gráfico de efeitos principais para a Rugosidade Ra medida na FACE A do corpo de prova(Fonte: autoria própria).

Considerando a profundidade de corte nota-se que o maior valor do início do corpo de prova e o maior valor no final do corpo de prova foram bem próximos atingindo 2,78 e 2,70 micrometros, respectivamente. A variação da profundidade de corte influencia na largura do cavaco e nos esforços de corte, assim com o aumento da profundidade de corte cavacos em fitas com maiores larguras podem se formar dificultando a sua quebra durante o processo torneamento e facilitando que os mesmos sejam enrolados na peça durante o processo.

A variação dos valores de rugosidade Ra foi bem maior para os parâmetros de avanço e profundidade de corte, porém sendo crescente em ambos. O maior valor de rugosidade Ra no início do corpo de prova foi 2,93 micrometros o menor valor no final do corpo de prova foi 2,78 micrometros quando foi variado o valor de avanço.

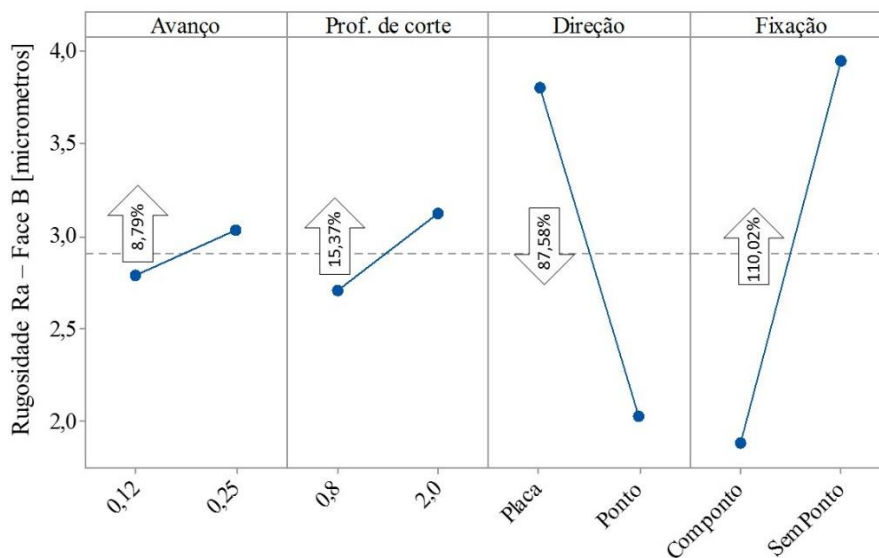


FIGURA 4. Gráfico de efeitos principais para a Rugosidade Ra medida na FACE B do corpo de prova (Fonte: autoria própria).

O avanço no processo de torneamento influencia diretamente os valores de rugosidade Ra, pelo fato da sua variação ter relação direta com o raio de ponta da ferramenta e com o deslocamento linear da ferramenta. No caso dos testes realizados neste trabalho o raio de ponta da ferramenta foi mantido constante em 0,8 milímetros, assim observa-se que em ambos os pontos de medição, o valor de rugosidade foi menor com o uso do menor valor de avanço. Segundo Ferraresi (1992) a minimização da rugosidade pode ser obtida com ferramentas de grande raio de ponta e pequenos valores de avanço.

Considerando a direção de corte, apesar de ser não usual, mas testado neste trabalho, cortar na direção da placa para o contraponto pode gerar em algumas situações valores

maiores de rugosidade que o método tradicional cortando-se do contraponto para a placa. O maior valor de rugosidade Ra considerando-se o sentido padrão contraponto-placa gerou valores máximos de 2,22 micrometros no início do corpo de prova, por outro lado torneando-se no sentido contrário ao tradicional o menor valor de rugosidade Ra foi de 2,99 micrometros no início do corpo de prova. Assim, nota-se que os melhores valores de rugosidade Ra são obtidos no sentido tradicional de torneamento e na região mais próxima da placa.

Considerando-se o sistema de fixação onde foi mantido o contraponto como apoio em algumas situações e sem o contraponto em outras condições de usinagem. Percebe-se que o apoio do contraponto melhora substancialmente a qualidade de peças tendo como referência a rugosidade Ra. No ponto mais próximo da placa, ou seja, no início do corpo de prova a variação da rugosidade Ra foi de 79%, por outro lado, quando se considera sem o apoio do contraponto esta variação pode chegar a 110%. O apoio do contraponto evita uma maior vibração do corpo de prova na extremidade

3.2 RESULTADOS DE CIRCULARIDADE

Na Figura 5 é mostrado o efeito principal para os parâmetros de entrada avanço e profundidade de corte. Nota-se que existe um aumento no valor de circularidade proporcional quando se altera estes parâmetros para os seus valores máximos. Para a variação de avanço este valor foi de 27,56% e para a profundidade de corte foi de 15,04%, sendo o valor máximo de 2,92 micrometros e o valor mínimo de 2,19 micrometros, ambos ocorreram com a variação do avanço. Observa-se que apenas o avanço e a profundidade de corte influenciaram na circularidade na região mais próxima da fixação, primeiramente, pelo fato destes formarem uma seção de corte onde ocorre o esforço de corte principal no processo de torneamento, e, em uma segunda análise pelo fato destes estarem relacionados com a remoção de material que é diretamente influenciada pela formação de cavacos durante o processo de torneamento.

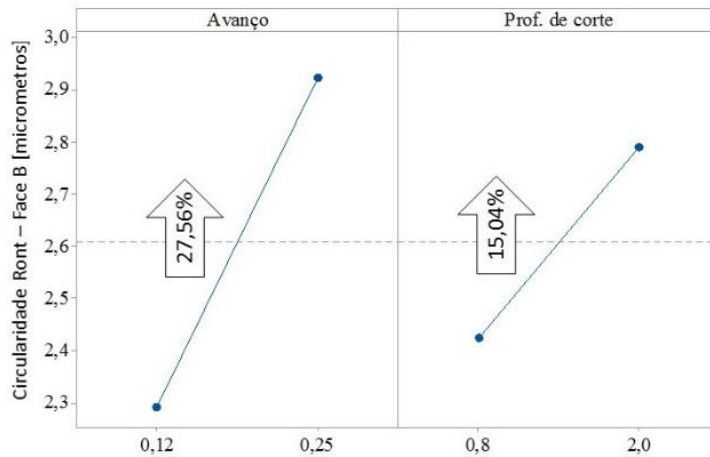


FIGURA 5. Gráfico de efeitos principais para a Circularidade Ron_t medida na FACE B do corpo de prova (Fonte: autoria própria).

Por outro lado, pode-se notar que os demais parâmetros de entrada velocidade de corte, direção e fixação estão relacionados diretamente a dinâmica do processo e não influenciaram a circularidade pelo fato de estarem mais próximos a ponto mais rígido da fixação que são as castanhas de fixação da placa do torno. A Figura 6 mostra os efeitos principais para o todos os parâmetros de entrada do processo de torneamento. Nota-se que o maior e o menor valor de erro de circularidade ocorreram com a variação do sistema de fixação, ficando na faixa de 13,29 a 34,48 micrometros. Por outro lado, os menores valores de erro de circularidade ocorreram para a velocidade de corte ficando entre 20,15 a 27,62 micrometros.

As informações apresentadas na Figura 6 mostram que o ponto mais afastado da fixação tem maior instabilidade, e por isto ocorrem os maiores valores de erro de circularidade. Nota-se que a velocidade de corte tende a aumentar a vibração do sistema quando foi utilizada o maior valor, sendo esta variação e 37,02% no aumento do erro de circularidade. A variação do avanço foi o segundo parâmetro de entrada a influenciar no erro e circularidade assim como a profundidade de corte, da mesma forma que ocorreu na FACE B do corpo de prova. Entretanto, nota-se que na FACE A estes valores foram significativamente maiores chegando a 120,35% quando se aumentou o valor da profundidade de corte. Isto ocorreu devido aos eventos comentados anteriormente nas medições realizadas na FACE B, e que tende a aumentar à medida que se afasta o ponto de remoção de material do ponto de fixação mais estável da peça.

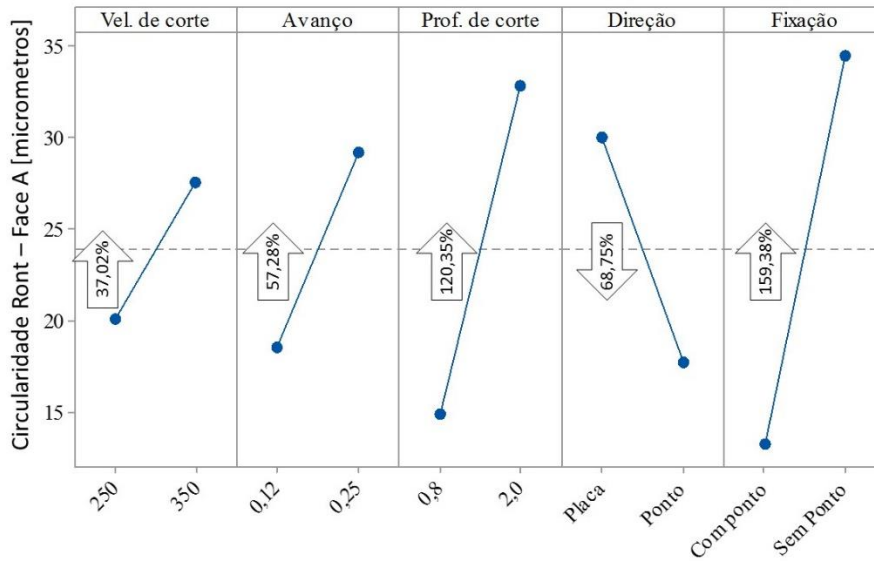


FIGURA 6. Gráfico de efeitos principais para a Circularidade Ron, medida na FACE A do corpo de prova (Fonte: autoria própria).

Além disso, pode-se notar que a direção de corte tem uma tendência de aumentar o erro de circularidade quando se usinou o corpo de prova no sentido contrário ao tradicional, ou seja, da placa para o ponto. Isto pode ser explicado pelo fato da estabilidade do corpo de prova tender a aumentar quando o processo de remoção do material se aproxima do ponto de fixação ficando mais estável. Por outro lado, quando se usina no sentido contrário ao tradicional existe uma tendência de aumento da vibração devido ao distanciamento do ponto de fixação que gera um aumento da vibração do sistema como um todo.

Finalmente, este trabalho comprova a importância do uso do sistema de contraponto rotativo quando é necessário usinar peças esbeltas e manter a qualidade do produto. O uso de contraponto rotativo não tem influência no erro de circularidade na FACE B pelo fato desta face estar mais próxima ao ponto de fixação da peça sendo esta a região mais estável como confirmado na Tabela 2. Porém, nota-se existe uma variação de 159,38% no erro de circularidade quando é usado ou não o sistema de contraponto rotativo.

Pode-se afirmar que o menor valor do erro de circularidade foi de 13,29 micrometros atingindo o máximo de 34,48 quando não foi empregado o contraponto rotativo. Dessa forma, nota-se que a melhor estratégia de usinagem para o processo de torneamento para gerar os menores valores de rugosidade Ra e os menores valores de erro de forma de circularidade depende não apenas dos parâmetros tradicionais do processo de torneamento, mas também do sentido de usinagem e do uso ou não do sistema de contraponto rotativo.

4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no estudo da rugosidade no torneamento externo do aço SAE 4340 com diferentes parâmetros de entrada, a saber, variáveis de corte, direção de usinagem e condição de fixação, podemos concluir que:

- ✓ Todos os parâmetros de entrada, isoladamente, influenciaram a variação da rugosidade Ra medida no início do corpo de prova;
- ✓ Considerando a variação da rugosidade Ra medida no final do corpo de prova, apenas os parâmetros de entrada Profundidade de corte, Direção e Fixação tiveram influência isoladamente;
- ✓ De forma geral, pode-se concluir que os melhores valores de rugosidade Ra foram obtidos, em uma primeira observação, com o uso de contraponto para as medições realizadas no início e no final do corpo de prova ficando em 2,22 micrometros. Por outro lado, os piores valores de rugosidade Ra foram obtidos sem o uso de contraponto para as medições realizadas no final do corpo de prova ficando em 2,93 micrometros;
- ✓ Considerando o erro de circularidade pode-se afirmar que apenas o avanço e a profundidade de corte influenciam de forma significativa na região mais próxima ao ponto de fixação dos corpos de prova. Por outro lado, todos os parâmetros de entrada tiveram influência no ponto mais afastado da região de fixação dos corpos de prova;
- ✓ O menor valor para o erro de circularidade, na região mais afastada do ponto de fixação foi 13,29 micrometros e o máximo erro foi 34,48 micrometros.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

REFERÊNCIAS

ABOUELATTA, O. B. MÁDL, J. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 269-277, 2001.

- BANDASO, Z. S. LEONARD, J. The Effect of Tool Dimension, Tool Overhang and Cutting Parameters Towards Tool Vibration and Surface Roughness on Turning Process International Journal on Smart Material and Mechatronics, Vol. 2/ 1, pages 1-7, 2015.
- COLOSIMO, B. M. SEMERARO, Q. PACELLA, M. Statistical Process Control for Geometric Specifications: On the Monitoring of Roundness Profiles, Journal of Quality Technology, 40/1, 1-18, 2008.
- CHO, N. TU, J. Roundness modelling of machined parts for tolerance analysis, Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 25, 35-47, 2001.
- CHOI, J.P. LEE, S.J. KWON, H.D., Roundness Error Prediction with a Volumetric Error Model Including Spindle Error Motions of a Machine Tool, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 21, 923-928, 2003.
- DILWAR, F. SIDDIQUE, R. A. Analyzing the Effect of Overhang Length on Vibration Amplitude and Surface Roughness in Turning AISI 304, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 9/ 6, pages 1-7, 2018.
- FERRARESI, D. Usinagem dos metais. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 751p, 1990.
- MELO, S. A. Minimização dos erros micro e macro geométricos em peças torneadas usando a metodologia de superfície de resposta, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2016.
- MISHRA, V. KHAN, G. S. CHATTOPADHYAY, K.D. NANDA, K. SAREPAKA, R.G.V. Effects of tool overhang on selection of machining parameters and surface finish during diamond turning, Measurement, 55, Pages 353-361, 2014.
- MONTGOMERY, D. Design and Analysis of Experiments. New York: John Wiley and Sons, 9th Edition, 630 pages, 2017.
- PATWARI, A. U. ALFAKIH, Y. M. BAMNJO, I. Investigation of tool overhang length effects on Machining responses during turning operation, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara -International Journal of Engineering, pages, 1-4, 2018
- WU, C. F. J. HAMADA, M. S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization, 2nd Edition, 2009, 760 pages.