

ANÁLISE DE ERROS DE FORMA E RUGOSIDADE DE PEÇAS EM AÇO ENDURECIDO TORNEADAS INTERNAMENTE COM FERRAMENTA COM LONGOS BALANÇOS

Filipe Ribeiro

Instituto Senai de Inovação em Manufatura Avançada e Microfabricação, R. Bento Branco de Andrade Filho, 379 - Santo Amaro, São Paulo - SP, 04757-000, Brasil
filiperibeirosemai@gmail.com

Lucas Alexandre de Carvalho

Wallyson Thomas Alves da Silva

Matheus Nobre e Silva Lima

University of Miskolc, 3515 Miskolc, Hungria

lucasalecarvalho@gmail.com, wallyson35012726@gmail.com, matheusnobre@poli.ufrj.br

Aloísio Agnaldo de Souza Santos

Escola SENAI "A. Jacob Lafer", Av. Santos Dumont, 300 - Ipiranguinha, Santo André - SP, 09015-320, Brasil
aloisio.agnaldo@sp.senai.br

Resumo. O processo de torneamento interno se trata de uma operação muito importante e comumente utilizada para o desbaste e acabamento de furos. Esta operação necessita assegurar qualidade superficial e geométrica, principalmente em peças que trabalham em conjunto com outras peças externas. Nestes casos, a definição correta dos parâmetros de trabalho contribui para o sucesso da qualidade da peça. Este trabalho tem como objetivo analisar os erros de forma e rugosidade de peças submetidas ao processo de torneamento interno com ferramenta em longos balanços. Para tanto, foram feitos ensaios com aço SAE 4340, tratado termicamente, com dureza de 55 HRC, torneados com pastilha de cerâmica e barra de torner interna com fixação mais rígida possível. Através de um perfilômetro e uma máquina de medir desvios de forma, foram medidos os parâmetros de rugosidade R_a e R_t , bem como os desvios de circularidade e de cilindridade da peça. Tais medições permitiram identificar os níveis de estabilidade da barra de torner e os erros microgeométricos e macrogeométricos da peça. Após os testes, foi possível concluir que os erros avaliados aumentam à medida que aumenta a relação entre comprimento e diâmetro da ferramenta, mesmo em condições estáveis de fixação e sem a presença de vibrações.

Palavras chave: Torneamento interno. Rugosidade. Circularidade. Cilindridade.

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores necessários para garantir a qualidade superficial da peça é a estabilidade da ferramenta. Em furos longos é muito comum a ocorrência de vibrações devido ao balanço da ferramenta. Vibrações são bastante indesejáveis no processo, pois além de comprometerem o acabamento superficial, podem danificar o equipamento, e ainda danificar o ferramental e diminuir sua vida.

Outro fator que pode afetar a qualidade da usinagem é a forma de encaixe da fixação da ferramenta na torre. Esta fixação exige um cuidado especial, e necessita de uma fixação rígida para um controle eficiente da vibração.

Segundo Sandvik (2017) o processo de usinagem de material endurecido compreende materiais com dureza igual ou superior a 45 HRC e menor que 60 HRC. Estes, necessitam de uma ferramenta muito dura como cerâmica para execução das operações de corte para tanto indica-se a classe H de ferramentas. Tais materiais de ferramentas são frágeis e não possuem um bom desempenho em condições de vibrações mesmo com baixas amplitudes. Isso torna o processo de usinagem interna de materiais endurecidos um grande desafio para empresas do ramo metalmeccânico.

Embora a usinagem sem vibração seja o ideal, é muito difícil mantê-la economicamente ou tecnicamente nas linhas de produção. Mitsui (1978), ao analisar o parâmetro R_a de rugosidade, concluiu que a rugosidade da superfície afetada pela vibração era próxima a amplitude da vibração da ponta da ferramenta. A rugosidade, por sua vez, é aumentada pela vibração da ponta da ferramenta mesmo para pequenas amplitudes em máquinas-ferramenta de precisão equipadas por suportes de ar para evitar a vibração externa (Takasu, et al. 1985).

Nas operações de usinagem, um dos fatores que determinam se a peça manufaturada tem o acabamento superficial adequado para desempenhar a função a que se destina é a rugosidade da sua superfície. O termo rugosidade é utilizado para designar as amplitudes da rugosidade, tal como a altura total do perfil (R_t) e o desvio aritmético médio do perfil (R_a). Em alguns trabalhos encontrados na literatura os autores relacionam os parâmetros de usinagem (avanço) com a

Análise de erros de forma e rugosidade de peças em aço endurecido torneadas internamente com ferramenta com longos balanços profundidade de rugosidade (R_t) (König, 1993). Outros relacionam os parâmetros de usinagem com o desvio médio aritmético de rugosidade (R_a) (Oliveira, 2000).

Se considerada a topografia de superfície torneada ideal, no qual a geometria de ponta da ferramenta estivesse constante e a espessura de cavaco indeformada, seria observado que com o aumento do avanço de corte a rugosidade superficial seria mais alta, conseqüentemente, degradada. Alguns picos de rugosidade podem ocorrer periodicamente na superfície torneada após a passagem da ferramenta ao longo da peça e aumentado à medida que o avanço de usinagem aumenta. Sendo assim, podemos afirmar que o avanço de corte é o parâmetro de usinagem que mais influencia na rugosidade da peça (Smith, 2002). Com as demandas industriais sendo firmemente focadas na fabricação de precisão, necessitando de tolerâncias geométricas ainda mais estreitas como uma maior precisão da circularidade, justifica-se a necessidade de um melhor controle de forma. Durante os últimos 60 anos, sistemas de medição foram desenvolvidos com maiores níveis de sofisticação para medir a circularidade de um componente e seus parâmetros associados. É importante que os engenheiros, projetistas, operadores de máquinas-ferramenta e inspetores, tenham uma compreensão básica dos princípios de funcionamento desses instrumentos, juntamente com suas capacidades e limitações, e como interpretar os resultados de circularidade subsequentes. Além disso, os resultados da inspeção de circularidade podem ser empregados para monitorar uma gama de recursos de fabricação de componentes relacionados ao processo. Normalmente, o desempenho de uma máquina-ferramenta e o desgaste da ferramenta, são efeitos resultantes de procedimentos operacionais inadequados ou problemas de produção (Smith, 2002).

Pode-se afirmar segundo a ABNT NBR 6173:1980 que a tolerância de circularidade corresponde ao desvio da forma geométrica circular, que pode ser aceito sem comprometer a funcionalidade da peça. Esta característica é tolerada principalmente em peças cônicas e cilíndricas.

É importante dizer que uma seção transversal circular é a forma mais fundamental gerada pelo processo de fabricação utilizada pela indústria. Podemos pontuar também que devido à simetria de um componente de seção transversal circular, este pode exibir resistência mecânica uniforme em todas as direções que são simétricas ao eixo. As características dimensionais e geométricas da peça terão um efeito significativo no desempenho em serviço do componente, em qualquer trabalho de precisão, etc., onde o encaixe macho-fêmea é vital e/ou sua montagem rotacional deve ser estritamente controlada (Smith, 2002).

A avaliação dos erros de forma micro e macro geométricos são interdependentes já que, se um componente tiver rugosidade muito elevada, a forma geométrica dessa superfície pode ser ocultada por sua aspereza, que de outra forma, forneceria informações enganosas sobre a circularidade relativa do perfil da peça. A filtragem matemática pode ser aplicada ao perfil de circularidade, ou perfil modificado, para separar a rugosidade da forma geral (Chien, 1982 e Smith, 2002).

Na Figura 1 é mostrada a diminuição dos desvios de circularidade para diferentes processo de fabricação. O primeiro deles apresenta a furação com os maiores desvios de circularidade, passando pelo processo de torneamento interno e chegando ao acabamento com alargadores, no qual a circularidade obtida no furo tem alta precisão dimensional (de até cinco vezes maior comparado a operação de furação) (Smith, 2002).

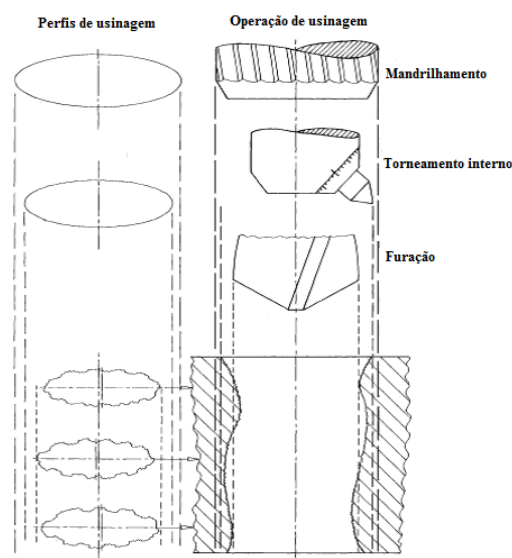


Figura 1. Perfis de circularidade para diferentes operações de usinagem interna (Smith, 2002)

É possível prever que os erros introduzidos pelo processo de furação sejam bastante grandes conforme mostrado pelos perfis exibidos na Fig. 1. Estes erros também são gerados devido às elevadas relações entre comprimento e diâmetro da ferramenta. A rigidez da ferramenta, por sua vez, irá influenciar na geometria e na rugosidade do furo. Se a ferramenta for muito longa e não tiver uma fixação rígida, ocorrerão, inevitavelmente, desvios geométricos no furo.

Portanto, para se alcançar melhor qualidade geométrica e superficial do furo, muitas vezes é apropriado utilizar a operação de torneamento interno e mandrilhamento, já que estas operações não seguem o contorno do furo e, como tal, eliminam os erros induzidos pela broca. Finalmente, a operação de mandrilhamento irá transmitir a dimensão do furo acabado, e simultaneamente melhorar a circularidade e a textura da superfície. Em particular, a operação de torneamento interno de precisão pode, de fato, eliminar a necessidade da operação de mandrilhamento subsequente, proporcionando uma economia significativa nos custos de usinagem (Smith, 2002).

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do balanço da ferramenta na rugosidade (R_a e R_t) e dos erros de forma (cilindricidade e circularidade) da peça, no torneamento de um material endurecido com diferentes balanços da ferramenta (distância da ponta da ferramenta até o início da fixação).

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para realização dos ensaios foi utilizado um Torno CNC da marca Hardinge, modelo GS 150, com 21 kW (28,35CV) de potência e rotação máxima de 6000 rpm. O suporte dos inserts utilizado foi o S25T – DDUNR – 15, marca Widia-Tools e diâmetro de 25 mm, que permite a fixação rígida dos inserts com a substituição do grampo de fixação. O suporte apresenta um ângulo de folga de 7° , ângulo de saída de -6° , ângulo de inclinação de -6° e ângulo de posição de 93° . O inserto adotado para esta usinagem foi de cerâmica mista DNGA 150608 classe CW2015, marca Widia-Tools, de geometria losangular com furo para fixação, raio de ponta (r_e) de 0,8 mm, chanfro de 0,1 mm x 20° , ângulo de posição (χ_r) 93° , ângulo de saída no inserto (γ) 0° , ângulo de ponta (ϵ) 55° e ângulo de folga (α) 0° (Widia, 2021). Utilizou-se para os ensaios quatro corpos de prova de aço SAE 4340, temperado no forno à vácuo e em seguida revenido à 55 HRC, conforme especificado na Fig. 2 (a) e (b).

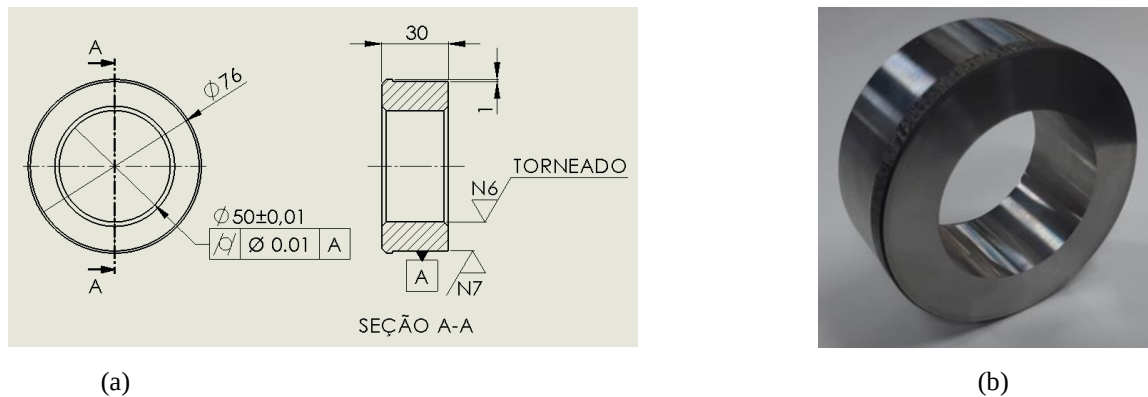


Figura 2. (a) Projeção ortográfica e (b) imagem do corpo de prova (fora de escala)

Os ensaios foram realizados sem sistema de refrigeração e parâmetros de corte constantes, com velocidade de corte (v_c) de 140 m/min, avanço de corte (f) de 0,1 mm/rotação e profundidade de corte (a_p) 0,5 mm. As condições de fixações da barra inteiriça na torre de fixação, esquematizada na Fig. 3, foram determinadas considerando a distância a partir da ponta da ferramenta até o início da bucha de redução da ferramenta. A condição de fixação do suporte da barra inteiriça seguiu a seguinte distribuição em relação ao parâmetro L/D (relação entre o comprimento “L” e o diâmetro “D” da ferramenta): 3; 3,5; 4; 4,5 e 5.



Figura 3. Esquema de acoplamento da ferramenta na torre da máquina

A rugosidade da superfície cilíndrica da peça foi medida 5 vezes e verificada em três pontos equidistantes (120°) em uma temperatura controlada de laboratório de 20°C , a cada vez que a ferramenta usinava a região, para cada condição de

Análise de erros de forma e rugosidade de peças em aço endurecido torneadas internamente com ferramenta com longos balanços

fixação citada anteriormente. Portanto, para que fosse quantificado o acabamento obtido no torneamento através da rugosidade, foi utilizado um Perfilômetro modelo SURFCOM 1900SD2, marca Accretech, com resolução no eixo X e eixo Z igual a 0,04 μm , força de medição de 0,75 mN e incerteza expandida de 0,01 μm ($k=2$), seguindo a norma NBR ISO 4287/2002 e DIN 4768 (1990-2005). Além disso, para tratar o perfil bruto de rugosidade foi utilizado o filtro de Gauss e o comprimento de amostragem (cut-off) utilizado foi igual a 0,8mm, seguindo a norma ISO 4288:1996.. Este instrumento realiza a medição de diversos parâmetros. Foram adotados o desvio aritmético médio do perfil (R_a) e a altura total do perfil (R_t). Para avaliar o desvio de cilindridade e concentricidade das amostras, foi utilizado uma máquina de medir desvios de forma modelo RONDCOM 54, da marca Accretech, com precisão de rotação na direção radial e axial de 0,02 μm , paralelismo de 1 μm na direção radial e de 0,7 μm no eixo Z e incerteza expandida de 1 μm ($k=2$).

Para Geier, Mello e Souza (2011) quando se trata de insertos convencionais (standard), existem grandezas que afetam a rugosidade média obtida no torneamento, sendo elas: o avanço f (mm/volta) e o raio de quina r_e (mm) da ferramenta de corte. A Equação (1) mostra uma relação entre estas grandezas:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_e} \quad (1)$$

Onde: R_a = rugosidade média (μm).

3. RESULTADOS

Nesta seção foram analisados a influência da rugosidade e os erros de forma sobre a rigidez estática da barra de torner, no processo de torneamento interno do aço endurecido com longos balanços. A rigidez estática de uma barra é a capacidade que a mesma tem de resistir a uma força de flexão (força perpendicular ao eixo principal da barra de torner) em condições estáticas. Sendo que, uma estrutura é mais rígida à medida que deflete menos sob a ação de uma força.

No caso do torneamento interno, o balanço da ferramenta é, em conjunto com os parâmetros de corte, fator fundamental para a obtenção de um bom acabamento da peça. A Tabela 1 e as Fig. 4 e Fig. 5 trazem o comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t , em função do balanço efetivo da ferramenta.

Tabela 1 – Valores de rugosidade e erros de forma em diferentes balanços (em μm)

Balanço (L/D)	R_a	R_t	Circularidade	Cilindridade
3	0,16 $\pm$ 0,02	1,09 $\pm$ 0,06	6,18 $\pm$ 0,25	7,76 $\pm$ 0,52
3,5	0,16 $\pm$ 0,02	1,14 $\pm$ 0,06	6,86 $\pm$ 0,32	10,10 $\pm$ 0,62
4	0,15 $\pm$ 0,01	1,28 $\pm$ 0,06	7,20 $\pm$ 0,50	10,80 $\pm$ 0,64
4,5	0,13 $\pm$ 0,01	1,44 $\pm$ 0,07	8,90 $\pm$ 0,54	15,00 $\pm$ 0,86
5	3,37 $\pm$ 0,17	16,22 $\pm$ 1,52	15,08 $\pm$ 2,16	26,28 $\pm$ 3,16

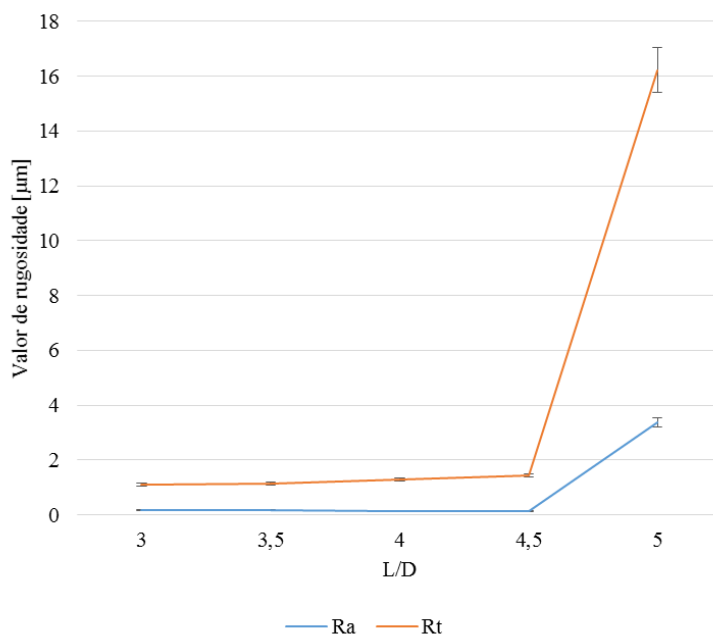
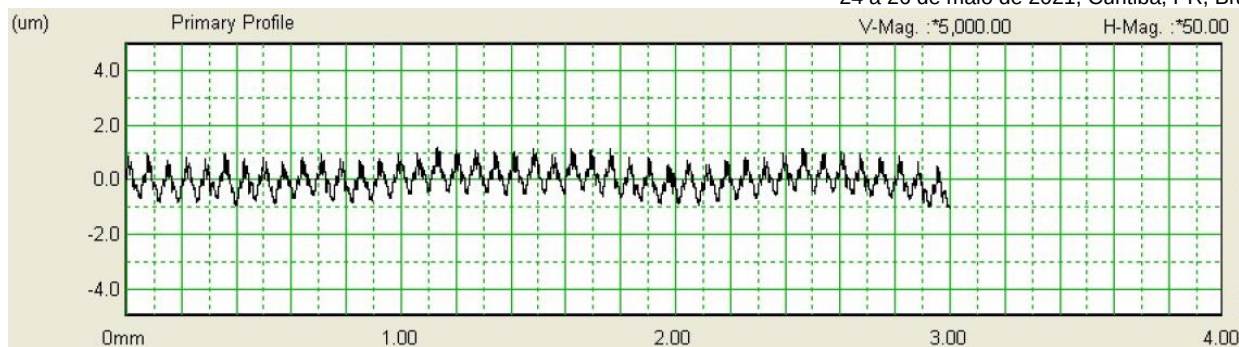
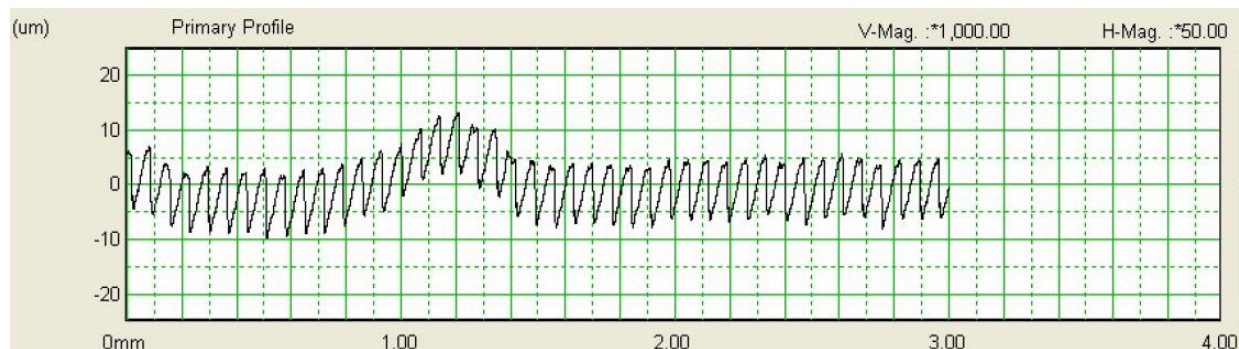


Figura 4. Comparação entre a rugosidade (R_a e R_t) e os diferentes balanços da ferramenta



(a)



(b)

Figura 5. Perfil efetivo de rugosidade para (a) $L/D=3$ e (b) $L/D=5$.

Pode-se verificar na Fig. 4 que, para ambos os parâmetros medidos, a rugosidade da peça é independente do valor do balanço da ferramenta até um determinado valor de balanço, a partir do qual a rugosidade cresce abruptamente. Observa-se ainda que, na faixa de balanços inferiores a este limite de L/D de 4,5, as rugosidades obtidas são bem próximas, enquanto que para valores superiores ao limite de L/D de 4,5 é onde começa a influência da vibração sobre a rugosidade.

Também é possível observar que o valor teórico da rugosidade de $0,4 \mu\text{m}$ obtida pela Eq. (1) foi mais de três vezes inferior ao maior valor de rugosidade obtido no experimento equivalente a $0,13 \pm 0,01 \mu\text{m}$ para um balanço de 112,5 mm. Este fenômeno se deve, dentre outros fatores, a vibração do sistema de usinagem, desgaste da ponta da ferramenta e fluxo lateral de cavaco impossibilitando o cisalhamento do material da peça cuja a porção necessária para atingir a rugosidade calculada foi maior.

Os perfis obtidos nas Fig. 5(a) e Fig. 5(b) também embasam o comportamento observado para a rugosidade, uma vez que, o avanço e o raio de ponta da ferramenta, que formam a rugosidade teórica da peça (contribuição geométrica do avanço e do raio de ponta para a rugosidade), foram os constantes durante os ensaios. Em outras palavras, a vibração é o principal fator de diferenciação da rugosidade, influenciada aqui pela rigidez estática da barra nos diversos balanços testados. Portanto, é possível dizer que a instabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça é o fator de maior importância sobre as condições de acabamento superficial, e não as condições de corte. Assim, quanto maior a rigidez do sistema menor é a rugosidade.

Por último, os limites de balanço que provocam aumento súbito de rugosidade ($L/D = 4,5$), são provocados pela baixa rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça, inviabilizando o uso de balanços mais longos. Os desvios de circularidade e cilindridade, em micrometros, estão apresentados nas Fig. 6, Fig.7 e Fig. 8.

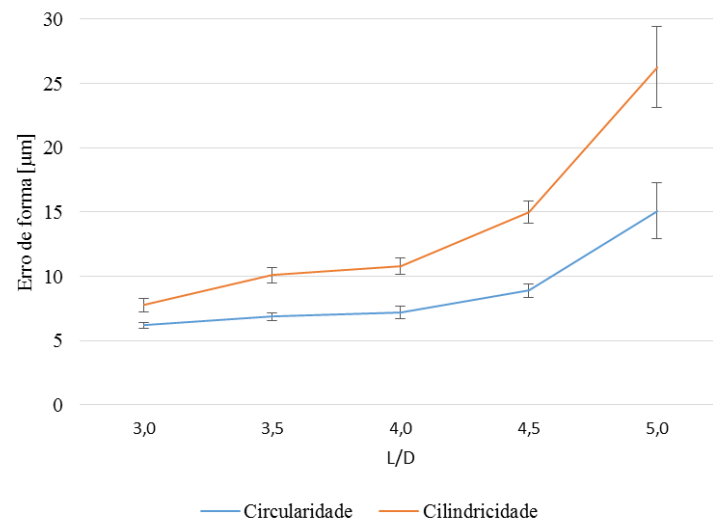


Figura 6. Comparação entre cilindridade, circularidade e os diferentes balanços da ferramenta

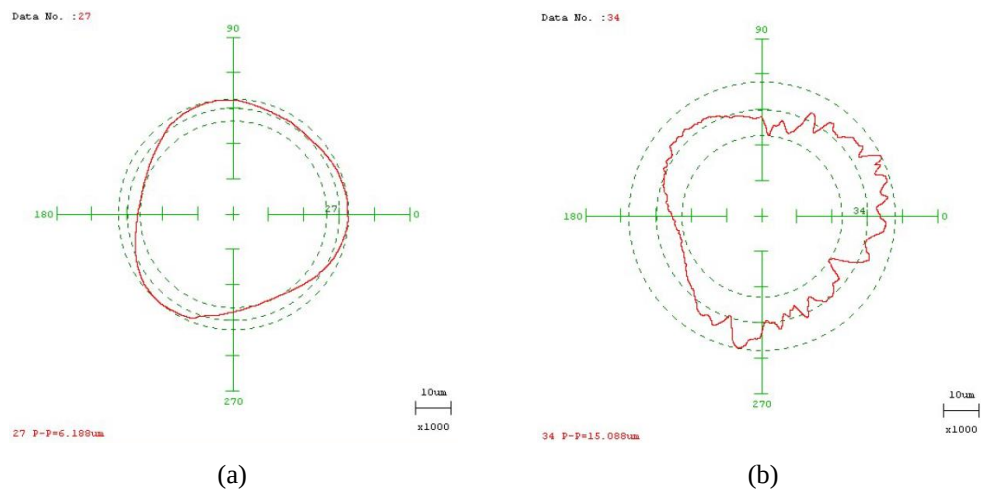


Figura 7. Perfil dos desvios de circularidade para (a) L/D=3 e (b) L/D=5

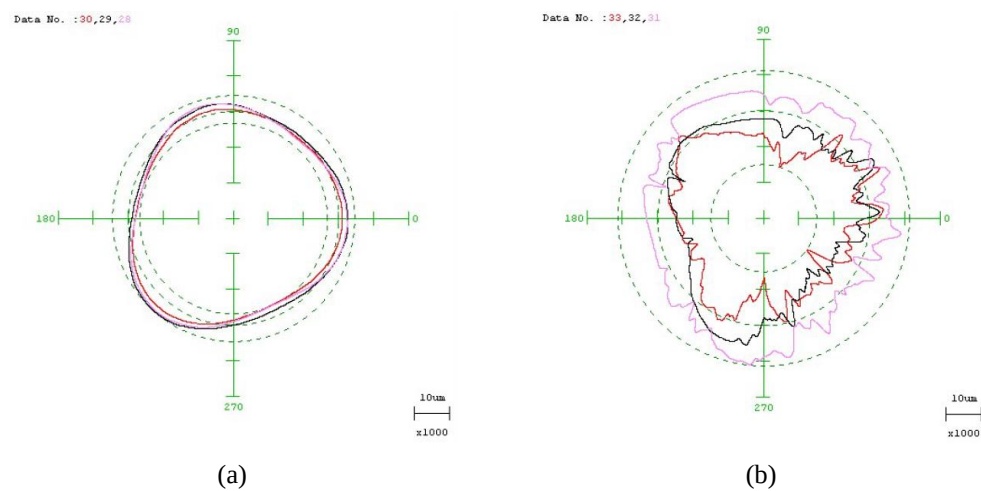


Figura 8. Perfil dos desvios de cilindridade para (a) L/D=3 e (b) L/D=5

Assim como observado nos resultados de rugosidade, é possível afirmar que a instabilidade da ferramenta, configurado pela baixa rigidez da ferramenta de torneamento interno em longos balanços, gera uma deflexão tal que interfere no perfil de circularidade e cilindridade da peça torneada.

A direção radial da peça na operação de torneamento interno, por sua vez, é a que mais interfere no acabamento da superfície. Qualquer movimentação no sentido radial da ferramenta influencia tanto a rugosidade, quanto a tolerância dimensional e geométrica da peça. Assim, o aumento do balanço provocou o aumento gradativo dos erros de forma, como observado na Fig. 6, e quando ultrapassado o limite de estabilidade da ferramenta ($L/D = 4,5$) houve a quebra prematura do inserto, gerando um perfil geométrico irregular, Fig. 7 (b) e Fig. 8 (b), que prejudicou a intercambiabilidade das peças.

Embora os erros no perfil de circularidade e cilindridade não possam ser completamente eliminados, uma tentativa para manter os valores mínimos de erro é ajustar a fixação da ferramenta para o menor balanço possível ($L/D = 3$). Como apontado por Thomas (2021), dentre outras técnicas eficientes para aumentar a estabilidade do sistema e diminuir a vibração na operação de torneamento interno de longos balanços.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o balanço da ferramenta influencia na rugosidade e nos erros de forma (circularidade e cilindridade) da peça. Para valores de balanço da ferramenta em que o corte é estável, L/D entre 3 e 4,5, a rugosidade se mantém praticamente constante, fazendo com que a barra de torner possa ser usada para furos mais profundos que L/D igual a 3.

Portanto, quando o sistema de corte está na condição estável, a amplitude de vibração da ferramenta é pequena, e os erros micro e macro geométricos são considerados aceitáveis para esta operação. Porém, existe um valor de balanço em que o desvio de circularidade, cilindridade e a rugosidade da peça crescem de maneira acentuada e súbita, caracterizando a partir deste balanço um regime instável de operação.

5. AGRADECIMENTOS

À Escola e Faculdade SENAI “Roberto Mange” e Escola SENAI “A.Jacob Lafer” pela parceria com o Departamento de Máquinas-ferramenta da Universidade de Miskolc.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 4287, 2002. “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.”
- ABNT NBR 6173, 1980. “Terminologia de tolerâncias e ajustes.”
- Chien, A.Y., 1982. “Approximate harmonic models for roundness profiles with equivalent energy mean square values”. *Wear*, vol. 2, p. 247-252.
- DIN 4768, 1990-2005. “Determination of values of surface roughness parameters R_a , R_z , R_{max} using electrical contact (stylus) instruments Concepts and measuring conditions.”
- Geier, M.; Mello, M. S.; Souza, A. J., 2011. “Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - artigo. Porto Alegre, Brasil.
- International Organization for Standardization. ISO 4288, 1996. “Geometrical product specification – Surface texture: profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture.”
- König, W.; Berkold, A. E Koch, K.-F, 1993. “Turning versus Grinding - A Comparison of Surface Integrity Aspects and Attainable Accuracies”. p. 1-5. Aachen, Alemanha.
- Mitsui, M., 1978. “Frequency characteristic of cutting process identified by an in-process measurement of surface roughness”. *Annals CIRP* 27. n°. 1. p.67.
- Oliveira, J. A. C., 2000. “Cálculo do desvio médio aritmético R_a em função do avanço”. Curso de Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Brasil. 4 Feb. 2021 < <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/conem/2000/AC9690.pdf>>.
- Sandvik, 2017. “Silent tool for turning: overcome vibrations in internal turning”. 4 Feb. 2021 <<https://tibp.blob.core.windows.net/coromant/a9d341b5-16cc-4f7c-8e60-2f927ea651fa.pdf?sv=2014-02-14&sr=b&sig=gd6yrZv9dnCJrT4OJpY7FuBrp2rINAFabaFTmn70nBo%3D&st=2021-02-04T15%3A08%3A41Z&se=2031-02-02T15%3A13%3A41Z&sp=r&rsct=application%2Fpdf&rscd=inline%3B%20filename%3DC-2920-40.pdf>>.
- Smith, G.T., 2002. *Industrial Metrology Surfaces and Roundness*. Springer-Verlag, London, 1ª edição.
- Takasu, S., Masuda, M., Nishiguchi, T. and Kobayashi, A., 1985. “Influence of study vibration with small amplitude upon surface roughness in diamond machining”. *Annals CIRP* 34. n°. 1, p. 463-467.
- Thomas W., Fulop Z., Szilágyi A., 2021. “Passive Damping Techniques for Vibration Suppression in Boring Operation with Long Overhangs”. In *3rd Vehicle and Automotive Engineering - VAE 2020*. Miskolc, Hungary.
- Widia, 2021. “Turning”. 4 Feb. 2021 < <https://pdf.directindustry.com/pdf/widia-manchester/turning/7370-169906-2.html>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Analysis of form errors and roughness of hardened steel workpieces internally turned with tool in long overhangs

Abstract. *The internal turning process is a very important and widely used process for enlarging and finishing of holes. Especially for components that work with external members, this operation needs to assure surface and geometric quality. In this case, the correct definition of working parameters will directly contribute for the quality of the component. The current work has the aim of analysing the form errors and the roughness of workpieces submitted to internal turning process using boring bars in long overhangs. For the experiments heat-treated SAE 4340 steel, with 55 HRC of hardness, has been submitted to boring process using ceramic tools, and the boring bar with the most possible rigid fixation. The workpiece's roughness, roundness and cylindricity were measured using a profilometer and a form errors measuring machine. The measurements have provided data to identify the boring bar levels of stability, and the workpiece's micro and macro geometric errors. It was possible to conclude by the trials that the evaluated errors have increased with the increasing of the tool relation L/D even during stable fixation conditions, without any vibration.*

Keywords: *internal turning process, roughness, roundness, cylindricity.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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