

EFEITO DO ROLETEAMENTO SOBRE A QUALIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 4140 ENDURECIDO

Carlos Artur Alevato Leal

Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Rua Técnico Panamá, 45, Quarto Depósito, Santos Dumont MG, CEP: 36250-000, Brasil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil

carlos.leal@ifsudestemg.edu.br

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil
abrao@ufmg.br

Berend Denkena

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

denkena@ifw.uni-hannover.de

Bernd Breidenstein

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

breidenstein@ifw.uni-hannover.de

Kolja Meyer

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

meyer@ifw.uni-hannover.de

Resumo. O roleteamento é uma operação que consiste na deformação plástica de uma superfície provocada pela passagem de esferas, roletes ou pontas arredondadas sob pressão constante. Essa operação, considerada um tratamento mecânico superficial, é aplicada em diversas áreas da indústria com o objetivo de induzir tensões residuais de compressão e reduzir a rugosidade do componente. Neste trabalho, foi avaliada a influência da pressão (100, 200 e 300 bar), velocidade (20, 30 e 40 m/min) e avanço (0,06; 0,09 e 0,12 mm/volta) de roleteamento sobre a qualidade superficial do aço ABNT 4140 temperado e revenido para 40 HRC. Os parâmetros de amplitude do perfil avaliados foram: desvio aritmético médio (R_a), altura máxima do pico (R_p), profundidade máxima do vale (R_v) e altura máxima (R_z). O roleteamento reduziu em pelo menos 80% o valor de R_a em relação à superfície sem roleteamento (torneada). Comportamento similar foi encontrado para os valores de R_p e R_v , e, conseqüentemente, para R_z .

Palavras chave: Roleteamento; Qualidade superficial; Aço ABNT 4140 temperado e revenido.

1. INTRODUÇÃO

O roleteamento é uma operação que não envolve retirada de material e sim deformação plástica da superfície da peça; por isso, é considerada uma operação de conformação mecânica. Segundo Schulze (2006), o princípio básico do roleteamento é aplicar uma pressão superficial na zona de contato entre ferramenta e peça, causando um estado triaxial de tensões que muda com a profundidade e que depende da geometria de contato ferramenta/peça. Quando a tensão equivalente resultante excede a tensão de escoamento do material, deformações plásticas locais ocorrem, alterando o perfil superficial da peça e induzindo tensões residuais de compressão.

O roleteamento contribui para produzir uma superfície com perfil plano e de baixa rugosidade, mas sem alterar as dimensões ou a forma geométrica da peça. Além de ser benéfico para vida em fadiga, o baixo valor de rugosidade também melhora a resistência à corrosão do componente (AVILÉS *et al.*, 2013). A teoria proposta por Hertz em 1881 pode ser aplicada para estimar a rugosidade após o roleteamento, como o realizado por Bouzid *et al.* (2003) e Korzynski (2007), porém essa teoria considera apenas o regime elástico e por isso, deve ser utilizada com cautela. Estudos realizados por López De Lacalle *et al.* (2005), Chen e Shiou (2002) e Tekkaya *et al.* (2013) mostram que o roleteamento

pode ser usado na fabricação de ferramentas dos mais diversos materiais para injeção e estampagem (moldes e matrizes), pois a operação permite atingir bons níveis de qualidade superficial por meio da redução da rugosidade.

Loh e Tam (1988) afirmam que a força (pressão) e o avanço de roleteamento são os dois fatores mais importantes sobre a rugosidade de uma peça roleteada, sendo que a força de roleteamento determina o grau de deformação plástica ao qual a superfície é submetida. Por isso, dependendo do material, uma força de roleteamento (ou pressão) excessiva pode prejudicar o acabamento da peça devido à elevada deformação plástica ou lascamento da superfície, como relatado por Yeldose e Ramamoorthy (2008), Némat e Lyons (2000) e Abrão *et al.* (2014). O estudo realizado por Morimoto (1986), além de avaliar a influência da força de roleteamento sobre a rugosidade, concluiu que o uso de valores baixos ou altos do avanço de roleteamento prejudica o acabamento da peça roleteada. Quanto à velocidade de roleteamento, Morimoto (1986) e El-Axir (2000) constataram que o aumento excessivo nesse parâmetro produziu maior vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça, podendo prejudicar a rugosidade do componente roleteado. Com as informações citadas, este estudo foi realizado para avaliar a influência da pressão, da velocidade e do avanço de roleteamento sobre a qualidade superficial do aço ABNT 4140 endurecido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado na fabricação dos corpos de prova foi o aço ABNT 4140 e após a usinagem de desbaste, foi realizado o tratamento térmico de têmpera e revenimento para se obter uma dureza de 40 ± 2 HRC.

Para o torneamento a seco dos corpos de prova foi utilizado um torno equipado com comando numérico computadorizado (potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm). Tanto na operação de desbaste quanto na de acabamento, foi utilizado um suporte Mitsubishi Carbide código ISO SVVCN 2020-K16N e inserts VCMT 160408 UE6110 (metal duro classe ISO P10 com revestimento multicamada $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$). Para a operação de acabamento, os parâmetros adotados foram velocidade de corte no menor diâmetro do corpo de prova de 40 m/min, avanço de 0,15 mm/volta e profundidade de usinagem máxima de 0,25 mm.

O dispositivo para roleteamento da empresa alemã Ecoroll AG é constituído de um reservatório de fluido, uma bomba auxiliar (vazão de 30 l/min), uma bomba hidráulica de alta pressão e uma ferramenta de roletear hidrostática modelo HG6-20 com três esferas (diâmetro de 6 mm) defasadas em 120° . Este equipamento permite roletear corpos cilíndricos com diâmetro entre 3 e 12,5 mm sob pressão de até 400 bar. O equipamento foi montado no mesmo torno utilizado na usinagem dos corpos de prova, como mostrado na Fig. 1a. O lubrificante utilizado para o roleteamento foi o fluido sintético Petronas Mecafluid S3000 a uma concentração de 10% em água. As dimensões finais dos corpos de prova são mostradas na Fig. 1b e foram determinadas para realização posterior de ensaios de fadiga por flexão rotativa. A ferramenta de roletear foi acoplada à torre do torno como mostrado na Fig. 1c. Apenas a região central de cada corpo de prova foi roleteada. Os parâmetros de roleteamento variados foram pressão (P_r) de 100, 200 e 300 bar, velocidade (V_r) de 20, 30 e 40 m/min (variação da rotação de 1002 a 2005 rpm) e avanço (f_r) de 0,06; 0,09 e 0,12 mm/volta. Cada fator foi variado em três níveis em um planejamento fatorial completo. Para cada condição foi realizada uma réplica, totalizando 54 corpos de prova roleteados.

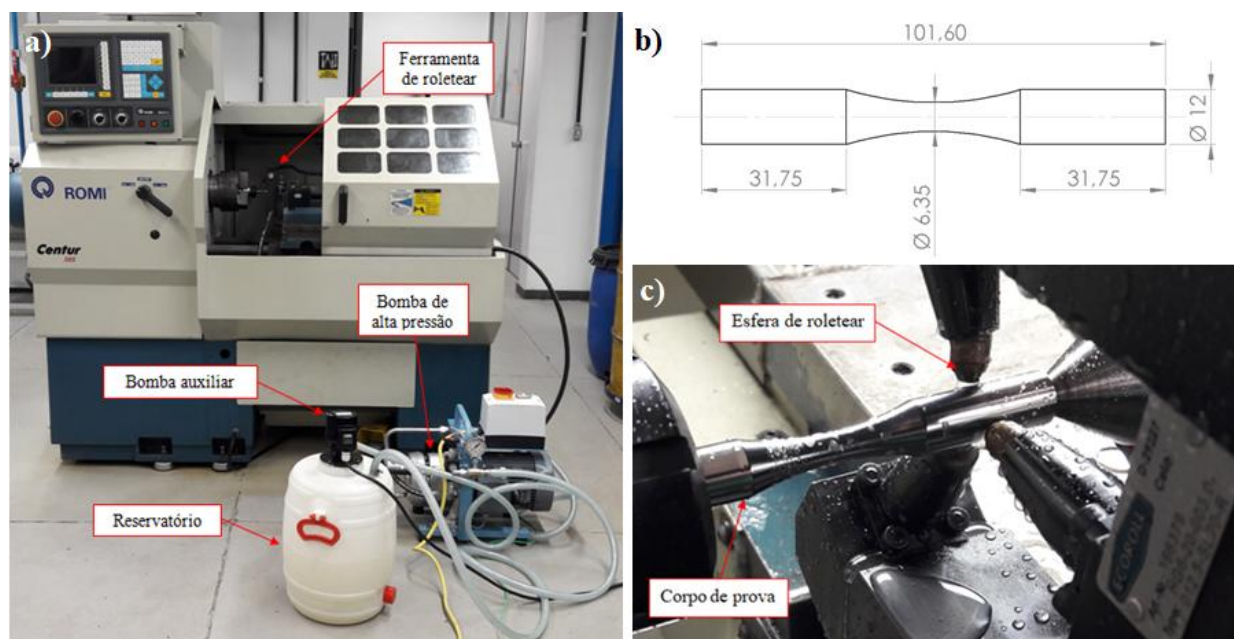


Figura 1. a) Montagem do equipamento de roletear no torno, b) dimensões do corpo de prova (em mm) e c) ferramenta de roletear acoplada à torre do torno.

Para medição de rugosidade dos corpos de prova foi utilizado o perfilômetro Hommelwerke LV-100 com apalpador TKU300/600. Os *softwares* utilizados pelo perfilômetro foram o *Turbo wave v7.55* para varredura e o *Hommelmap expert 6.2* para análise dos dados. Foi utilizada uma velocidade de varredura de 0,5 mm/s, um comprimento de aquisição de 5 mm, distância entre valores de medição de 1 μm e comprimento de amostragem de 0,8 mm. A medição de rugosidade foi realizada na direção perpendicular ao avanço e em três pontos equidistantes na região central do corpo de prova e seguiu a norma NBR ISO 4287:2002 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002). Os parâmetros do perfil avaliados foram: desvio aritmético médio (R_a), altura máxima do pico (R_p), profundidade máxima do vale (R_v) e altura máxima (R_z).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de desvio aritmético médio foram analisados fixando dois parâmetros de roleteamento em valores intermediários e variando o terceiro parâmetro com o objetivo de apresentar uma visão geral do comportamento de R_a . A Figura 2a mostra que para qualquer valor de pressão, a rugosidade média do corpo de prova torneado foi reduzida de 1,47 μm para um valor igual ou menor que 0,3 μm , indicando uma grande influência do roleteamento sobre esse parâmetro. O menor valor de R_a foi obtido para $P_r = 200$ bar, pois foi o nível que ocasionou a quantidade de deformação plástica na superfície adequada para diminuição dos picos e preenchimento dos vales do perfil. Já a menor pressão não provocou deformação plástica suficiente para reduzir tanto o valor de R_a e a maior pressão elevou deformação da superfície, invertendo o comportamento de esmagamento dos picos para escoamento exagerado da superfície e, consequentemente, criando picos maiores e vales mais profundos na superfície. Quanto à velocidade de roleteamento (Fig. 2b), os três valores limitaram o valor de R_a em, no máximo, 0,228 μm . Porém, a variação da velocidade de roleteamento não alterou significativamente o valor médio de R_a . Por fim, para a variação do avanço de roleteamento (Fig. 2c), a operação diminuiu o valor R_a de 1,47 μm para um máximo de 0,227 μm . A elevação do avanço indicou uma tendência de aumento de R_a , principalmente do menor avanço para o valor intermediário. Esse comportamento pode ser explicado pela menor deformação plástica ocasionada pelo maior espaçamento entre as trajetórias subsequentes das esferas ao longo da superfície.

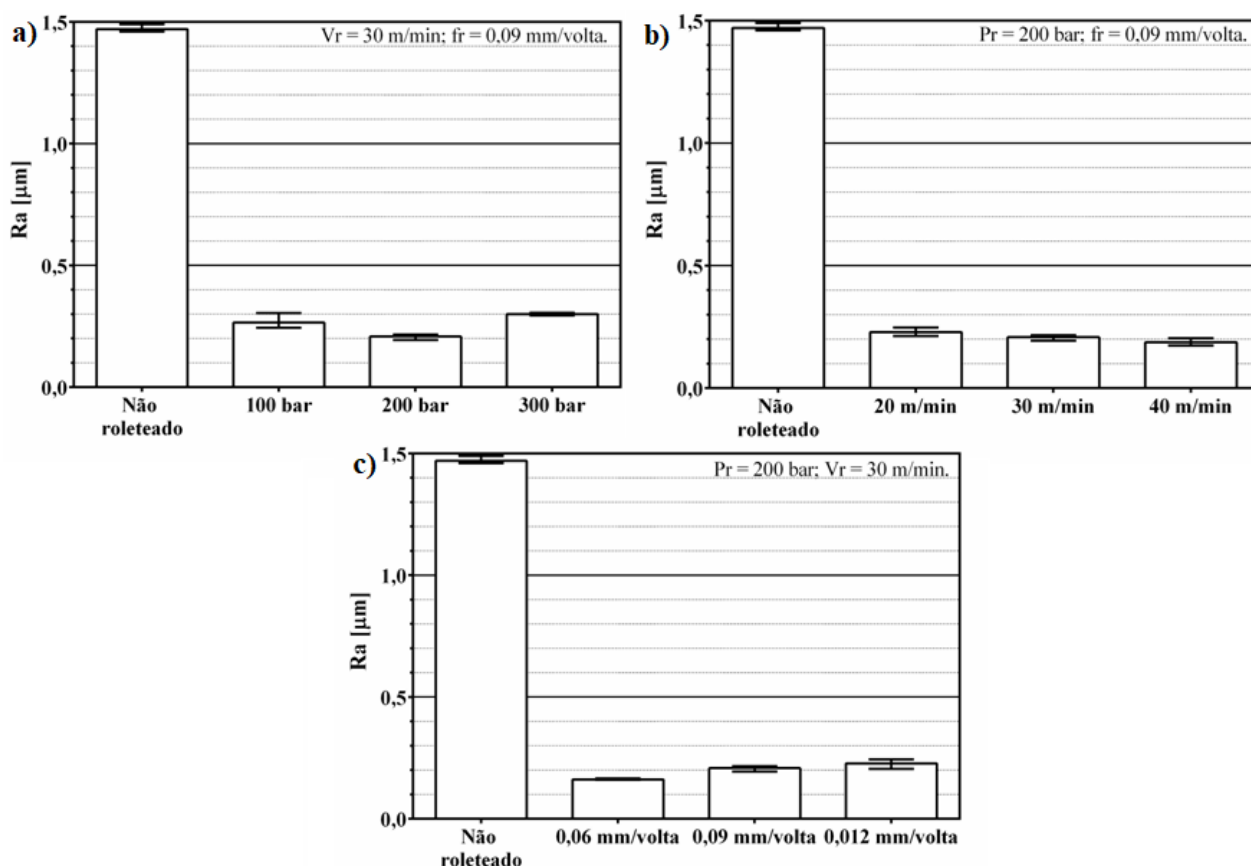


Figura 2. Variação de R_a em função de: a) pressão (P_r), b) velocidade (V_r) e c) avanço (f_r) de roleteamento.

A altura máxima do perfil (R_z) representa a soma da altura máxima do pico (R_p) com a maior profundidade do vale (R_v) do perfil no comprimento de amostragem. De modo análogo aos dados de R_a , a análise dos dados de R_p e R_v

fixou dois parâmetros de roleteamento em valores intermediários e variou o terceiro parâmetro. De acordo com a Fig. 3a, o roleteamento reduziu o valor médio de R_z (7,633 μm) do corpo de prova não roleteado para no máximo 2,316 μm , devido à redução considerável dos valores de R_v e R_p . Uma possível explicação para isso pode ser o preenchimento dos vales pelo material deformado nos picos. Para pressões de 100 bar e 200 bar, os valores de R_v e R_p foram muito próximos, produzindo o menor valor médio de R_z (0,965 μm). Já a elevação da pressão de roleteamento para 300 bar duplicou o valor de R_z em comparação aos dois níveis de pressão, pois possivelmente o aumento de deformação plástica induziu o afundamento da superfície. Outro ponto importante é que o roleteamento modificou a razão R_p/R_v para próximo de um, enquanto no corpo de prova não roleteado essa razão foi maior. Portanto, o roleteamento diminuiu mais os picos do que preencheu os vales do perfil. Para a variação de velocidade (Fig. 3b), o roleteamento reduziu o valor médio de R_z para um valor igual ou inferior a 1,109 μm , porém esse parâmetro de roleteamento não provocou alteração significativa nos valores de R_z , R_v e R_p . Além disso, novamente o roleteamento aproximou a razão R_p/R_v de um. Já a variação do avanço (Fig. 3c) produziu comportamento similar ao da velocidade, reduzindo o valor médio de R_z para no máximo 0,965 μm e a sua variação não induziu alteração significativa nos valores de R_z , R_v e R_p . Mais uma vez o roleteamento aproximou a relação R_p/R_v da unidade.

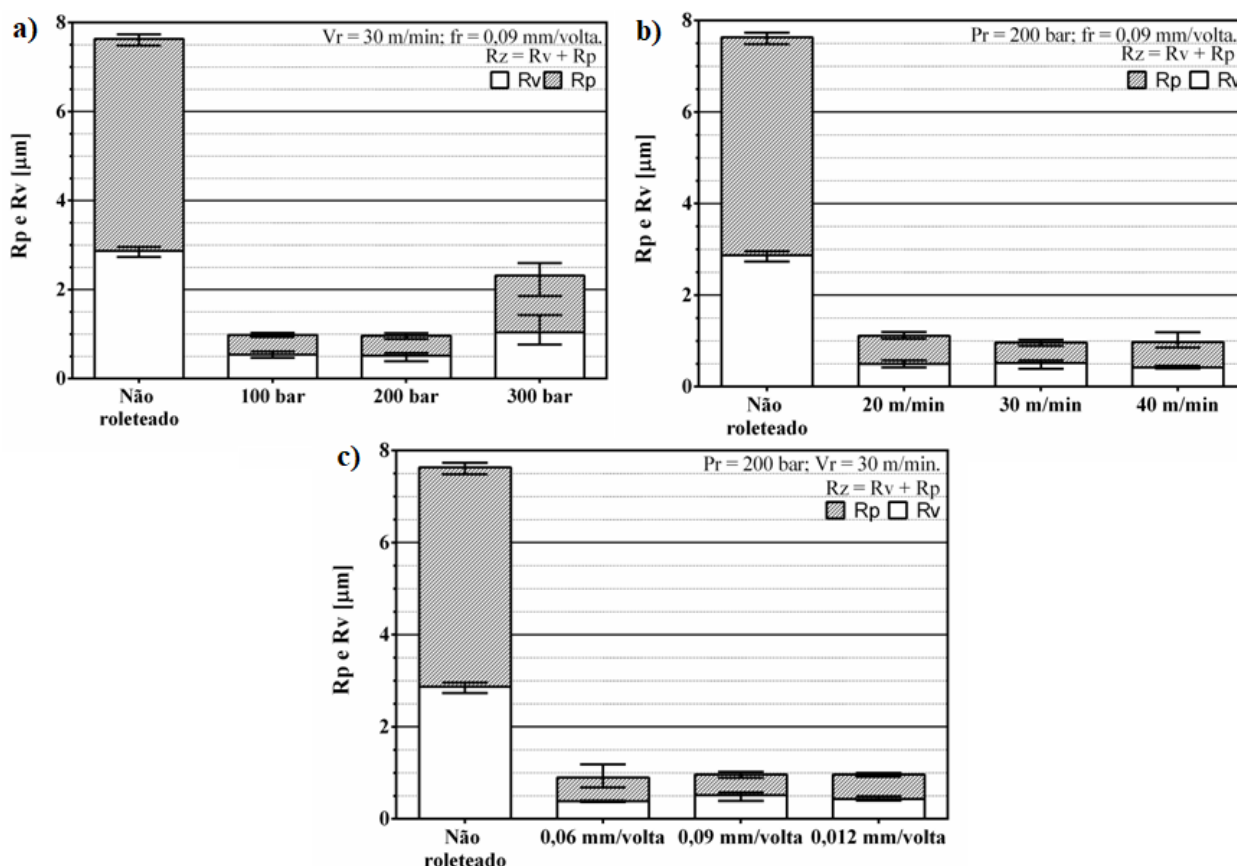


Figura 3. Variação de R_p e R_v em função de: a) pressão (P_r), b) velocidade (V_r) e c) avanço (f_r) de roleteamento.

4. CONCLUSÕES

Após o roleteamento dos corpos de prova de aço ABNT 4140 (40 HRC) previamente torneados, pode-se extrair as seguintes conclusões a respeito da influência dos parâmetros de roleteamento sobre a rugosidade:

- A operação de roleteamento reduziu o valor de R_a em pelo menos 80% em relação à superfície torneada;
- A pressão de 200 bar proporcionou o menor valor médio de R_a (0,213 μm) dentre as pressões testadas. A velocidade de roleteamento não alterou o valor médio de R_a . O aumento do avanço de roleteamento apresentou uma tendência de aumento do valor médio de R_a devido, provavelmente, pelo maior espaçamento entre as trajetórias subsequentes das esferas;
- O corpo de prova não roleteado apresentou valores médios de $R_v = 2,87 \mu\text{m}$ e $R_p = 4,76 \mu\text{m}$. Após o roleteamento, esses valores caíram para até 0,367 μm e 0,301 μm , respectivamente. A altura máxima do perfil (R_z) apresentou uma razão R_p/R_v próxima de um após o roleteamento, evidenciando a maior deformação plástica dos picos em relação ao preenchimento dos vales da superfície após a operação;

- A elevação da pressão de roleteamento ampliou os valores de R_p e R_v devido ao grande escoamento de material na superfície. Tanto a variação da velocidade quanto a variação do avanço de roleteamento não produziram modificação nos valores de R_z , R_p e R_v .

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao programa BRAGECRIM (CAPES/DFG), projeto nº 029/14, pelo apoio à realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. M. et al. Surface and subsurface alterations induced by deep rolling of hardened AISI 1060 steel. *Production Engineering*, v. 8, n. 5, p. 551–558, out. 2014.
- 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: ABNT, 2002.
- AVILÉS, R. et al. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue*, v. 55, p. 230–244, out. 2013.
- BOUZID, W.; TSOUMAREV, O.; SAĬ, K. An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 1, n. 1, p. 1–1, 11 jun. 2003.
- CHEN, C. H.; SHIOU, F.-J. Determination of Optimal Ball-Burnishing Parameters for Plastic Injection Moulding Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, n. 3, p. 177–185, 1 mar. 2002.
- EL-AXIR, M. . An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 40, n. 11, p. 1603–1617, set. 2000.
- KORZYNSKI, M. Modeling and experimental validation of the force–surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 12–13, p. 1956–1964, out. 2007.
- LOH, N. H.; TAM, S. C. Effects of ball burnishing parameters on surface finish—A literature survey and discussion. *Precision Engineering*, v. 10, n. 4, p. 215–220, out. 1988.
- LÓPEZ DE LACALLE, L. N. et al. Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 15, p. 1659–1668, dez. 2005.
- MORIMOTO, T. Examination of the burnishing process using a newly-designed tool. *Journal of Mechanical Working Technology*, v. 13, n. 3, p. 257–272, out. 1986.
- NÉMAT, M.; LYONS, A. C. An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel and Aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, n. 7, p. 469–473, 8 jun. 2000.
- SCHULZE, V. *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Germany: WILEY-VCH, 2006.
- TEKKAYA, A. E. et al. Friction analysis of thermally sprayed coatings finished by ball burnishing and grinding. *Production Engineering*, v. 7, n. 6, p. 601–610, nov. 2013.
- YELDOSE, B. C.; RAMAMOORTHY, B. An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 207, n. 1–3, p. 350–355, out. 2008.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EFFECT OF DEEP ROLLING ON THE SURFACE QUALITY OF HARDENED AISI 4140 STEEL

Carlos Artur Alevato Leal

Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Rua Técnico Panamá, 45, Quarto Depósito, Santos Dumont MG, CEP: 36250-000, Brasil

Graduate Program in Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brazil

carlos.leal@ifsudestemg.edu.br

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brazil
abrao@ufmg.br

Berend Denkena

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

denkena@ifw.uni-hannover.de

Bernd Breidenstein

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

breidenstein@ifw.uni-hannover.de

Kolja Meyer

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany

meyer@ifw.uni-hannover.de

Abstract. Deep rolling is a operation aiming at inducing residual stresses on metallic surfaces caused by the travel of balls, rollers or rounded tips under constant pressure. Additionally surface roughness is drastically reduced. In this work, the influence of rolling pressure (100, 200 and 300 bar), speed (20, 30 and 40 m/min) and feed (0,06; 0,09 and 0,12 mm/rev) on the surface quality of quenched and tempered AISI 4140 steel to 40 HRC was assessed. The amplitude parameters of the profile evaluated were: mean arithmetic deviation (R_a), maximum peak height (R_p), maximum valley depth (R_v) and maximum height (R_z). In comparison with the turned surface, deep rolling reduced the value of R_a by at least 80%. Similar behavior was found for the values of R_p and R_v , and, consequently, for R_z .

Keywords: Deep rolling; surface quality; hardened AISI 4140 steel.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.