

EFEITO DO ROLETEAMENTO SOBRE A VIDA EM FADIGA 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. A maioria das falhas em componentes mecânicos é causada por fadiga mecânica. Essa falha é representada por uma ruptura progressiva em materiais submetidos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. Com o intuito de aumentar a resistência à fadiga mecânica dos materiais, a operação de roleteamento (considerada um tratamento mecânico superficial) é aplicada em diversas áreas da indústria para induzir tensões residuais de compressão que podem retardar a iniciação e a propagação de trincas por fadiga mecânica. A operação consiste na deformação plástica de uma superfície causada pela passagem de esferas, roletes ou pontas arredondadas sob pressão constante. Neste estudo, 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 vida em fadiga do aço ABNT 4140 temperado e revenido (40 HRC). Os resultados mostraram que a operação elevou a vida em fadiga para a maioria das condições testadas.

Palavras chave: Roleteamento; Vida em fadiga; Aço ABNT 4140 temperado e revenido.

1. INTRODUÇÃO

É sabido de longa data que a trinca ou fratura por fadiga mecânica é a principal causa de falhas em diversos equipamentos mecânicos. O termo fadiga passou a ser utilizado por diversos investigadores na Europa a partir do século XVII para indicar falhas (trincas ou fraturas) de componentes sob carregamento repetido ou cíclico (HOEPPNER, 1996). A fratura por fadiga inicia, em geral, com uma trinca microscópica em uma região do material com alta tensão local, quase sempre onde existe um concentrador de tensão geométrico (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Com o objetivo de aumentar a durabilidade e confiabilidade dos componentes mecânicos pesquisadores desenvolveram, a partir da década de 1960, a operação de roleteamento. Essa operação 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 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, induzindo tensões residuais de compressão nas regiões próximas ao contato e reduzindo a rugosidade da peça roleteada. Segundo Wagner (1999), a presença de tensões residuais de compressão exerce pouco ou

nenhum efeito sobre a nucleação da trinca, porém elas retardam a propagação de trincas em ligas de titânio. Além disso, nesse mesmo estudo, o autor afirma que a redução da rugosidade retarda a nucleação de trincas, mas não afeta sua propagação.

Estudos realizados por Abrão *et al.* (2014), Rodríguez *et al.* (2012) e Blasón *et al.* (2017) mostram que o aumento da pressão de roleteamento eleva a intensidade da tensão residual de compressão induzida pelo roleteamento. O estudo realizado por Trauth *et al.* (2013) compara três materiais diferentes (liga de níquel ASTM B637, aço ASTM 4140 e ferro fundido ASTM A536-80-55-06) e observa a mesma influência da pressão de roleteamento. Nesse mesmo estudo foi observado que a elevação da velocidade de roleteamento não altera ou modifica levemente a intensidade da tensão residual de compressão de acordo com o material roleteado. Por fim, o aumento do avanço de roleteamento provocou uma leve redução ou nenhuma modificação na intensidade da tensão residual de compressão.

Quanto à vida em fadiga, Zhang e Lindemann (2005) afirmam que o aumento da pressão de roleteamento eleva o número de ciclos até a falha por fadiga, mas que valores excessivos de pressão de roleteamento reduzem a vida em fadiga devido ao surgimento de defeitos na superfície, tais como microtrincas e lascamentos. Comportamento similar foi encontrado para dois materiais diferentes (ferro fundido AISI 32510 e aço AISI8620) no trabalho realizado por Kloos, Fuchsbauer e Adelman (1987). Motivado pelos dados citados, este estudo foi realizado para avaliar a influência da pressão, da velocidade e do avanço de roleteamento sobre a vida em fadiga 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 usinagem a seco dos corpos de prova foi utilizado um torno comandado numericamente (potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm). Tanto na operação de desbaste quanto na de acabamento, foi utilizado um suporte de tornear Mitsubishi Carbide código ISO SVVCN 2020-K16N e insertos VCMT 160408 UE6110 (metal duro classe ISO P10 com revestimento multicamada TiCN-Al₂O₃-TiN). Para a usinagem de acabamento, os parâmetros adotados foram: velocidade de corte no menor diâmetro de 40 m/min, avanço de 0,15 mm/volta e profundidade de usinagem máxima de 0,25 mm.

O dispositivo para roleteamento produzido pela 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 (Fig. 1a) 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. O lubrificante utilizado para o roleteamento foi o fluido sintético Petronas Mecafluid S3000 (concentração de 10% em água). As dimensões finais dos corpos de prova para ensaios de fadiga por flexão rotativa são mostradas na Fig. 1b e apenas a região central de cada corpo de prova foi roleteada. Os parâmetros de roleteamento variados foram pressão (Pr) de 100, 200 e 300 bar, velocidade (Vr) de 20, 30 e 40 m/min (variação da rotação de 1002 a 2005 rpm) e avanço (fr) 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.

Paralelamente ao roleteamento, foram realizados ensaios de tração para determinação da tensão de escoamento a 0,2% ($\sigma_{0,2}$). Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Shimadzu modelo AG-IS, com célula de carga de 100 kN e o *software Trapezium 2* foi utilizado para coleta de dados. Dois corpos de prova (Fig. 1c) foram fabricados com dimensões baseadas na norma NBR 6152:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). Os parâmetros de usinagem para acabamento foram: velocidade de corte no menor diâmetro de 55 m/min, avanço de 0,05 mm/volta e a profundidade de usinagem máxima de 1,25 mm.

A rugosidade dos corpos de prova foi avaliada por meio do 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 μ m 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

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados no equipamento *Fatigue Dynamics Inc.* modelo RBF-200, que atinge rotação máxima de 10000 rpm e momento máximo de 22,6 N.m. A máquina de fadiga possui um contador independente para registrar o número de ciclos até a ruptura do corpo de prova. A rotação dos testes de fadiga foi fixada em 3400 rpm para evitar regiões de ressonância da máquina e velocidades muito altas que poderiam levar ao aquecimento dos corpos de prova devido à alta taxa de deformação. Por fim, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca TESCAN, modelo VEGA 3 para visualização da superfície roleteada próxima à fratura por fadiga e da seção fraturada.

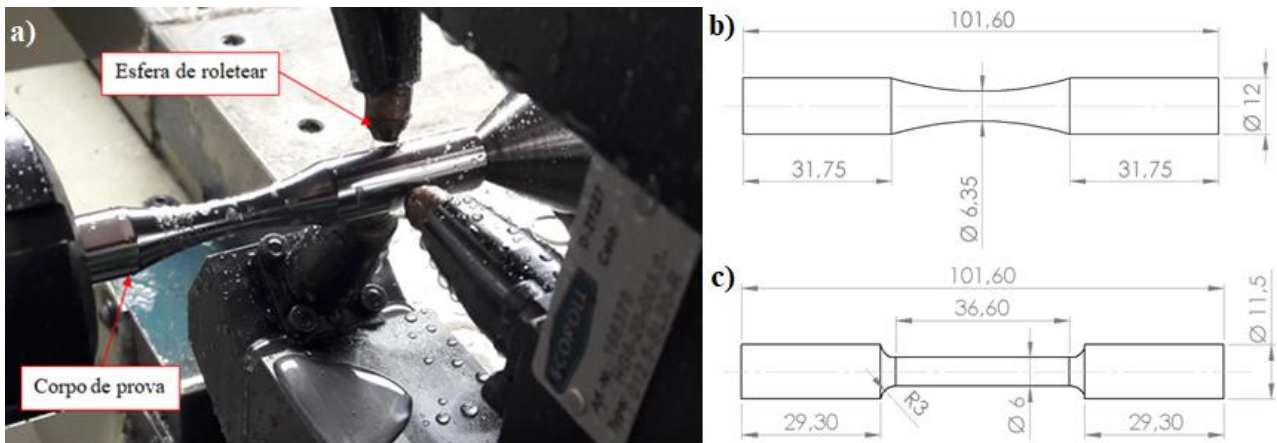


Figura 1. a) Ferramenta de roletear acoplada ao torno e dimensões (em mm) do corpo de prova b) fadiga e c) tração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de tração forneceu o valor médio da tensão de escoamento a 0,2% de 1181 MPa e da tensão máxima (σ_{\max}) de 1371 MPa, sendo o primeiro empregado para se determinar o momento fletor (M) a ser aplicado nos ensaios de fadiga. O objetivo foi encontrar uma carga adequada para evitar tanto a fadiga de baixo ciclo ($\leq 10^4$ ciclos) quanto à duração prolongada dos ensaios ($\geq 10^6$ ciclos). Apenas os corpos de prova não roleteados foram utilizados na determinação desse momento, pois a expectativa era que estes se rompessem após um menor número de ciclos. Foi empregado o valor de 55% da $\sigma_{e0,2}$ (649,63 MPa), pois nessa tensão a vida em fadiga apresentou um número médio de ciclos de 37200.

A vida em fadiga foi analisada fixando dois parâmetros de roleteamento em valores intermediários e variando o terceiro parâmetro. A Figura 2a apresenta a vida em fadiga de acordo com a variação da velocidade de roleteamento. As três condições de roleteamento elevaram a vida em fadiga média em pelo menos 28850 ciclos em comparação com o corpo de prova não roleteado. A velocidade de roleteamento de 30 m/min apresentou a maior vida em fadiga média, porém, devido às dispersões (valor máximo e valor mínimo) apresentadas na Fig. 2a não foi possível confirmar esse comportamento. Quanto à variação do avanço de roleteamento, a Fig. 2b mostra que as três condições mais que duplicaram a vida em fadiga média em comparação com o corpo de prova não roleteado. O avanço intermediário apresentou a vida média mais longa, entretanto devido às dispersões (valor máximo e valor mínimo) mostradas na Figura 2b não foi possível afirmar essa característica. Sob as três pressões avaliadas (Fig 2c), a vida média em fadiga foi elevada em pelo menos 20900 ciclos em comparação ao corpo de prova não roleteado. Para pressões de 100 e 200 bar, o número médio de ciclos foi similar. Esse comportamento pode ser indicativo de que essas duas pressões provocaram deformações plásticas na superfície adequadas para obter condições que elevem a resistência à fadiga, como tensões residuais de compressão e rugosidade baixa. Estudos realizados por Meyer e Kämmler (2016) e Lu, Scholtes e Macherauch (1992) evidenciaram a presença de tensões residuais de compressão após o roleteamento do aço AISI 4140. Quanto à rugosidade, neste estudo foi verificado previamente que, para pressões de 100 e 200 bar, a altura total do perfil (Rz) foi de 0,982 e 0,965 μm , respectivamente, enquanto, sob pressão de 300 bar, o Rz apresentou valor médio de 2,316 μm . A Figura 2d mostra a superfície roleteada sob 300 bar. Nota-se a presença de escamas, o que gerou maiores valores de Rz e facilitou (concentrador de tensões) a iniciação de microtrincas na superfície.

No corpo de prova não roleteado (34900 ciclos) mostrado na Fig. 3a, é possível detectar diversas marcas de catraca, mas sem marcas de praia. Segundo Sachs (2005), marcas de catraca indicam origens múltiplas de trincas e podem resultar de alta tensão na peça ou de alta concentração de tensões. Esse mesmo autor afirma que as marcas de praia ou de progressão indicam variações substanciais na tensão sob a peça durante o crescimento da trinca na seção. Em geral, muitas marcas de catraca apontam para alta concentração de tensões, que pode ter relação com o elevado valor médio de Rz (7,633 μm) encontrado na peça apenas torneada. Nessa seção, a área de sobrecarga (última região de material rompida rapidamente devido à redução da seção pelo crescimento da trinca) apresentou tamanho intermediário, o que indica tensões moderadas sob a peça. As Figs. 3b e 3c apresentam as seções fraturadas sob pressões de roleteamento igual 100 e 200 bar, respectivamente. As duas figuras apresentam características similares, como: uma única origem da trinca (setas vermelhas), sem marcas de praia e área de sobrecarga com tamanho intermediário. Portanto, sugerem baixa concentração de tensão e tensão intermediária aplicada na peça. Já a Fig. 3d (Pr = 300 bar) apresenta características próximas à da peça não roleteada com presença de algumas marcas de catraca e sem marcas de praia. Esse comportamento reforça a hipótese das escamas geradas nas superfícies serem concentradores de tensão na superfície e proporcionarem diversas origens para microtrincas como visto na Fig. 2d, o que reduziu o número de ciclos em pelo menos 30800 ciclos em comparação as outras duas pressões.

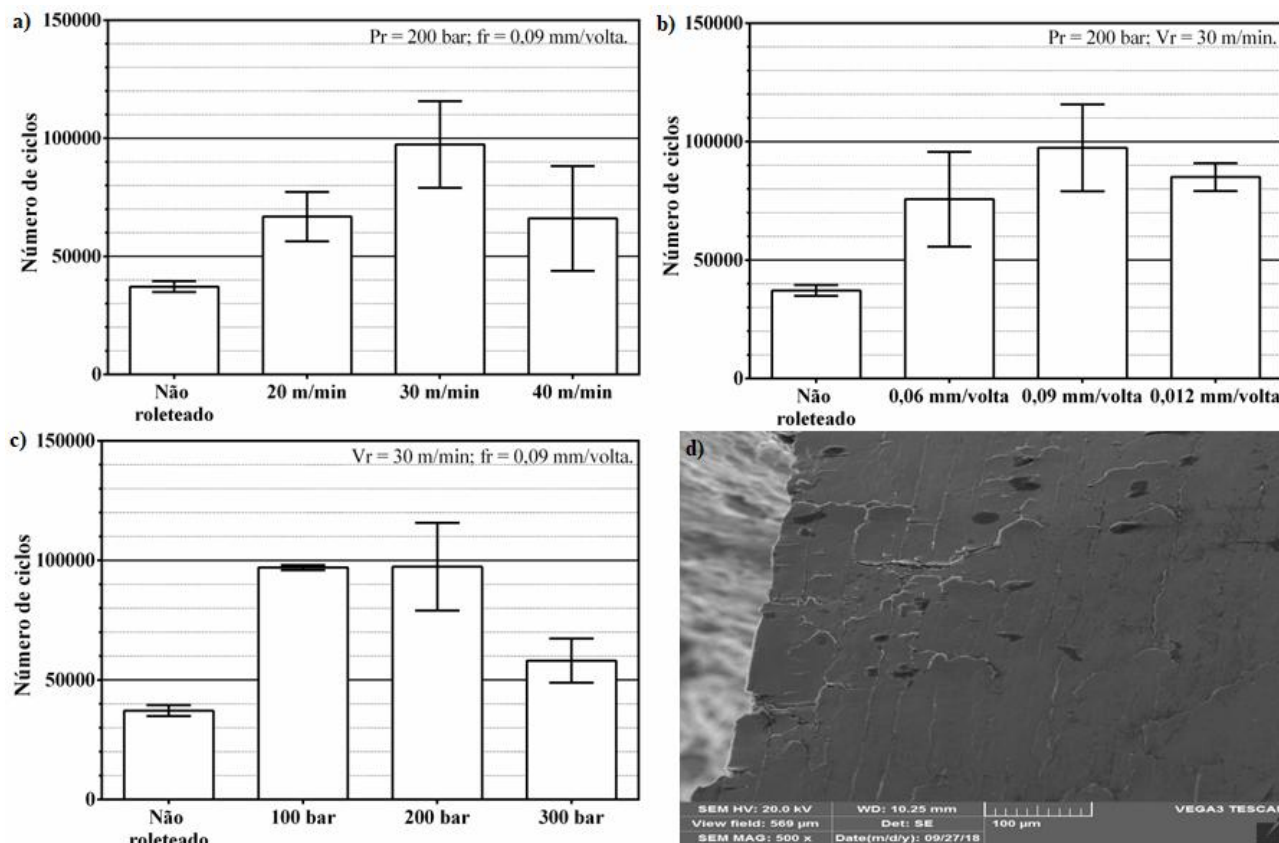


Figura 2. Vida em fadiga em função: a) da velocidade de roleteamento, b) do avanço de roleteamento e c) da pressão de roleteamento. d) superfície roleteada ($Pr = 300$ bar, $Vr = 30$ m/min e $fr = 0,09$ mm/volta) próxima à fratura por fadiga.

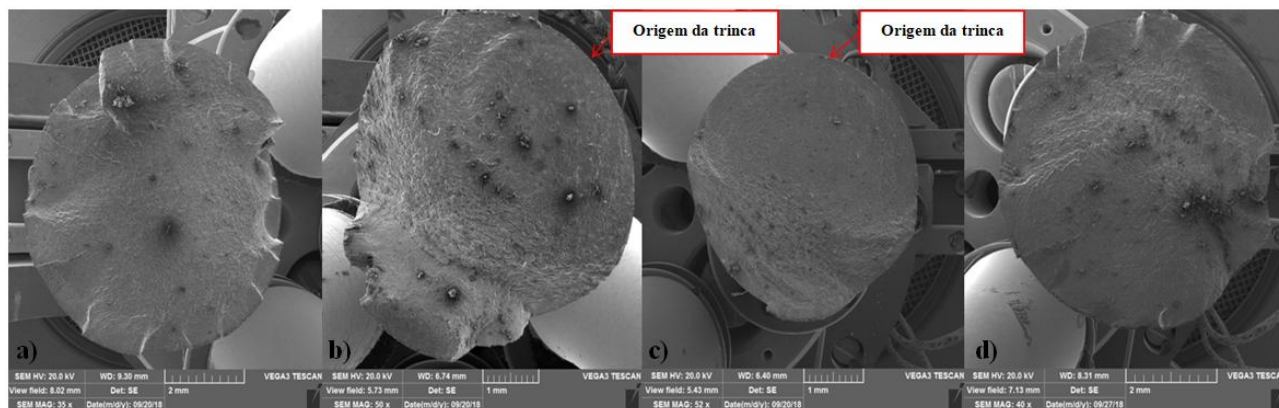


Figura 3. Seções dos corpos de prova: a) torneado (34900 ciclos) e roleteado ($Vr = 30$ m/min e $fr = 0,09$ mm/volta) sob b) $Pr = 100$ bar (98100 ciclos), c) $Pr = 200$ bar (115700 ciclos) e d) $Pr = 300$ bar (67300 ciclos).

4. CONCLUSÕES

Após o roleteamento de corpos de prova de aço ABNT 4140 (40HRC) previamente torneados, pode-se concluir o seguinte a respeito da influência dos parâmetros de roleteamento sobre a vida em fadiga:

- A operação de roleteamento elevou a vida em fadiga em praticamente todas as condições testadas. Para as condições analisadas neste trabalho, a vida em fadiga média foi aumentada em pelo menos 20900 ciclos (55%) em relação ao não roleteado;
- Devido às dispersões (valor máximo e valor mínimo) encontradas, não foi possível determinar comportamentos específicos da vida em fadiga em função da velocidade ou do avanço de roleteamento;

- As pressões de roleteamento de 100 e 200 bar produziram vida em fadiga média e características de fratura semelhantes. Porém, a pressão de 300 bar reduziu a vida em fadiga quando comparada às outras duas pressões, embora a vida em fadiga ainda tenha sido superior a das amostras não roleteadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao programa BRAGECRIM (CAPES/DFG), projeto n° 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 6152: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- BLASÓN, S. et al. Fatigue behaviour improvement on notched specimens of two different steels through deep rolling, a surface cold treatment. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 92, p. 223–228, dez. 2017.
- HOEPPNER, D. W. Industrial Significance of Fatigue Problems. In: *FATIGUE AND FRACTURE*. 1. ed. USA: ASM International, 1996. v. 19p. 10–13.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas. 4a edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- KLOOS, K.; FUCHSBAUER, B.; ADELMANN, J. Fatigue properties of specimens similar to components deep rolled under optimized conditions. *International Journal of Fatigue*, v. 9, n. 1, p. 35–42, jan. 1987.
- LU, H.; SCHOLTES, B.; MACHERAUCH, E. Randschichtzustände von normalisiertem und vergütetem 42 CrMo 4 nach konsekutiven Kugelstrahl- und Festwalzbehandlungen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, v. 23, n. 11, p. 388–394, 1 nov. 1992.
- MEYER, D.; KÄMMLER, J. Surface Integrity of AISI 4140 After Deep Rolling with Varied External and Internal Loads. *Procedia CIRP*, v. 45, p. 363–366, 2016.
- RODRÍGUEZ, A. et al. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, v. 206, n. 11–12, p. 2817–2824, fev. 2012.
- SACHS, N. W. Understanding the surface features of fatigue fractures: How they describe the failure cause and the failure history. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 5, n. 2, p. 11–15, abr. 2005.
- SCHULZE, V. *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Germany: WILEY-VCH, 2006.
- TRAUTH, D. et al. Time-efficient Prediction of the Surface Layer State after Deep Rolling using Similarity Mechanics Approach. *Procedia CIRP*, v. 9, p. 29–34, 2013.
- WAGNER, L. Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, v. 263, n. 2, p. 210–216, maio 1999.
- ZHANG, P.; LINDEMANN, J. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. *Scripta Materialia*, v. 52, n. 10, p. 1011–1015, maio 2005.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EFFECT OF DEEP ROLLING ON THE FATIGUE LIFE 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. *Most failures in mechanical components are caused by mechanical fatigue. This failure is the result of a progressive rupture in materials subjected to cyclic loading. In order to increase the fatigue strength of metals and their alloys, deep rolling is employed in various areas aiming at the inducement of compressive residual stress which may hinder crack initiation and propagation. 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 fatigue life of quenched and tempered AISI 4140 steel (40 HRC) was evaluated. The results showed that fatigue life increased for most conditions tested.*

Keywords: *Deep rolling; fatigue life; quenched and tempered AISI 4140 steel.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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