

Influência da operação de roleteamento sobre a integridade superficial do aço ABNT 1020

Influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1020 steel

Filipe Figueiredo dos Santos¹, Sandro da Costa Silva^{1,2},
Alexandre Mendes Abrão¹, Berend Denkena³,
Bernd Breidenstein³, Kolja Meyer³

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, CEP: 31270-901, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 7675, CEP: 30510-000, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Hannover, Germany.

e-mail: filipe_fsantos@hotmail.com, abrao@demec.ufmg.br, sandro.costa@ifmg.edu.br, denkena@ifw.uni-hannover.de, breidenstein@ifw.uni-hannover.de, meyer@ifw.uni-hannover.de

RESUMO

A integridade superficial corresponde a um conjunto de características da superfície e da camada subsuperficial que tem grande influência sobre o desempenho funcional de componentes mecânicos em condições de desgaste, corrosão e fadiga, e é determinada pelos processos de fabricação empregados. Assim, tratamentos superficiais são utilizados para a geração de uma integridade superficial adequada à função desejada. O roleteamento é um dos tratamentos superficiais que atuam por deformação plástica a frio da superfície e da camada subsuperficial. Neste trabalho avaliou-se a influência de alguns parâmetros de roleteamento (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre determinadas características da integridade superficial (rugosidade, microdureza superficial e subsuperficial e microestrutura) do aço-carbono ABNT 1020. Observou-se uma melhora significativa do acabamento após o roleteamento, porém a elevação excessiva da pressão e do avanço causou um aumento da rugosidade. Em relação à microdureza da superfície, após o roleteamento ocorreu apenas sua manutenção ou redução. Além disso, em todas as condições avaliadas o roleteamento promoveu um aumento da microdureza subsuperficial e da profundidade afetada em relação aos observados no corpo de prova apenas torneado. Entretanto, a elevação da pressão aumentou ainda mais a microdureza subsuperficial e a profundidade afetada, o aumento do avanço elevou levemente a microdureza subsuperficial e o aumento do número de passes a reduziu, juntamente com a profundidade afetada. A análise microestrutural, por fim, mostrou uma elevação da deformação com o aumento da pressão e do número de passes e uma redução com o aumento da velocidade e do avanço.

Palavras-chave: Roleteamento, integridade superficial, aço ABNT 1020, rugosidade, microdureza.

ABSTRACT

Surface integrity refers to a set of characteristics of the surface and subsurface layer that have great influence on the functional performance of mechanical components under conditions of wear, corrosion and fatigue, and is determined by the manufacturing processes employed. Thus, surface treatments are used to generate a surface integrity suited to the desired function. Deep rolling is one of the surface treatments that involve cold working of the surface and subsurface layer. This work addresses the influence of some deep rolling parameters (pressure, speed, feed and number of passes) on the surface integrity (roughness, surface and subsurface microhardness and microstructure) of AISI 1020 low carbon steel. A significant improvement on surface finish was observed after deep rolling, however, the excessive increase in pressure and in feed caused an increase in roughness. Regarding the surface microhardness, it was reduced or remained stable after deep rolling. In addition, under all conditions tested deep rolling promoted an increase in the microhardness of the

subsurface layer and in the affected depth in comparison to the specimen only turned. However, an elevation in pressure further increased the subsurface microhardness and the affected depth and the subsurface microhardness increased slightly with higher feeds and reduced with increasing number of passes, along with the affected depth. Finally, the microstructural analysis showed that deformation increased with pressure and number of passes and reduced with the elevation of speed and feed.

Keywords: Deep rolling, surface integrity, AISI 1020 steel, roughness, microhardness.

1. INTRODUÇÃO

A integridade superficial se refere ao estado topográfico, mecânico, químico e metalúrgico da superfície e da camada subsuperficial de componentes mecânicos, incluindo o conhecimento sobre as tensões residuais, a dureza e as estruturas metalúrgicas e sua relação com o desempenho funcional, e influencia as resistências à fadiga, à corrosão e ao desgaste, entre outras [1]. Em relação à resistência a fadiga, por exemplo, sulcos, pites, marcas de usinagem e outras irregularidades superficiais atuam como concentradores de tensão e promovem a nucleação de trincas [2]. Dessa forma, componentes com superfícies lisas e polidas normalmente exibem vida em fadiga mais longa. O endurecimento da camada subsuperficial, restringindo sua deformação permanente, também é uma forma efetiva de retardar a nucleação de trincas e, assim, melhorar a sua resistência à fadiga [3]. Além disso, a melhoria da vida em fadiga é alcançada com tensões residuais compressivas, principalmente [2].

Tratamentos de superfície são frequentemente utilizados em componentes mecânicos após a usinagem para a produção de uma integridade superficial adequada às funções pretendidas [4]. Os dois mais importantes métodos mecânicos de tratamento superficial são roleteamento e jateamento de granalha [2]. Contudo, enquanto o jateamento de granalha exige um equipamento específico e pode prejudicar o acabamento produzido pela operação anterior, o roleteamento pode ser realizado em máquinas-ferramenta convencionais (apenas fixando-se nelas o equipamento apropriado), promove uma notável melhoria do acabamento superficial e tem a capacidade de produzir uma camada mais profunda de tensões residuais compressivas [5].

O roleteamento é caracterizado por passes de um elemento rolante (rolete ou esfera) sobre uma superfície com força normal controlada e suficiente para deformar plasticamente a frio os picos de rugosidade em direção aos vales com movimentos longitudinais e rotacionais aplicados simultaneamente [5]. Os fatores que mais afetam o desempenho do roleteamento são: velocidade, avanço, força ou pressão aplicada à superfície, material e diâmetro do elemento rolante, número de passes e meio lubrificante.

Segundo SARTKULVANICH [6], a distância entre marcas sucessivas da esfera aumenta com o avanço e, assim, ela tem menos chances de suavizar todas as irregularidades. Para uma superfície mais suave, é recomendado que o avanço de roleteamento seja menor que o da operação de torneamento prévia, pois assim tem-se mais chances de planificar os picos de rugosidade e produzir mais deformação plástica na superfície devido à sobreposição de marcas sucessivas da esfera. De acordo com KLOCKE e LIERMANN [7], se o mesmo avanço for utilizado na usinagem e no roleteamento, a melhora do acabamento não é alcançada, pois o movimento da esfera será paralelo às marcas de avanço da superfície e não haverá achatamento dos picos.

ABRÃO *et al.* [8] constataram que a rugosidade de superfícies torneadas de aço AISI 1060 foi reduzida em qualquer condição de roleteamento, mas o aumento excessivo da pressão prejudicou o acabamento obtido. O número de passes, por outro lado, não apresentou influência considerável sobre a rugosidade. Em relação à dureza superficial, notou-se, em geral, seu aumento com a elevação da pressão e do número de passes devido ao aumento do grau de encruamento da superfície, porém, em certas condições, sua manutenção ou redução também foi observada, o que pode estar associado a uma maior uniformização das deslocamentos induzidas pelo torneamento. Além disso, verificou-se que a microdureza, a intensidade da deformação plástica e a profundidade da camada subsuperficial afetada aumentaram com a pressão e o número de passes.

EL-AXIR [9] encontrou em espécimes de aço Steel-37 uma forte interação entre velocidade, força, avanço e número de passes sobre o desvio médio aritmético (R_a), porém, em geral, o aumento da velocidade deteriorou a superfície devido ao aumento da vibração no sistema máquina-ferramenta e o aumento da força melhorou o acabamento até se tornar excessiva e danificar a superfície, provavelmente devido a falhas por cisalhamento. Além disso, a redução do avanço melhorou o acabamento, pois a deformação aumentou e o escoamento de metal tornou-se mais regular. O aumento do número de passes melhorou o acabamento devido ao aumento da homogeneidade da estrutura até que um endurecimento excessivo da camada subsuperficial provocou sua descamação. Em relação à microdureza superficial, constatou-se uma interação entre avanço, número de passes e velocidade, e entre número de passes e força. Todavia, em geral, o aumento da força elevou a microdureza superficial devido ao aumento do encruamento da superfície, o mesmo ocorrendo com o aumento do número de passes, sobretudo sob velocidades mais altas e forças mais baixas.

De forma similar, SEEMIKERI *et al.* [10] observaram uma interação entre pressão, velocidade, diâmetro da esfera e número de passes sobre a rugosidade e a dureza de amostras do aço AISI 1045. Em geral, o aumento da velocidade, da pressão e do número de passes e a redução do diâmetro da esfera promoveram a redução da rugosidade. Já a redução desses parâmetros promoveu um aumento da dureza superficial, sendo, neste caso, a velocidade dominante, seguida da pressão, do diâmetro e do número de passes.

Considerando avanço e força constantes, GHARBI *et al.* [11] verificaram uma relação aproximadamente parabólica entre velocidade e rugosidade em corpos de prova do aço AISI 1010, com Ra passando por um mínimo sob uma velocidade intermediária. Além disso, o aumento da força prejudicou o acabamento, especialmente sob altas velocidades, devido à falha por cisalhamento das camadas subsuperficiais. Os autores também encontraram uma interação acentuada entre esses fatores no estudo da dureza superficial e que, quando uma força mais alta é aplicada, aumenta-se a quantidade e a profundidade da deformação na camada subsuperficial, aumentando o seu encruamento.

No trabalho de RODRÍGUEZ *et al.* [12] com o aço AISI 1045, verificou-se que a velocidade e a pressão não apresentaram grande influência sobre a rugosidade, já a diminuição do avanço promoveu uma redução significativa de Ra; em várias condições, o valor de Ra foi reduzido em mais de uma ordem de magnitude em relação ao obtido do torneamento. Além disso, constatou-se que a velocidade e o avanço não apresentaram influência significativa sobre a dureza superficial. O aumento da pressão, por outro lado, elevou a dureza superficial e subsuperficial e a espessura da região subsuperficial encruada (a dureza subsuperficial aumentou em até 60%).

Utilizando o aço JIS S38C (comparável ao aço AISI 1038), MORIMOTO [13] notou que o aumento da força de roleteamento elevou a dureza superficial (uma elevação de mais de 50% em relação à da superfície apenas torneada foi alcançada). A utilização de um, dois ou três passes de roleteamento fez com que a dureza da superfície aumentasse em 35%, 40% e 45%, respectivamente, e, de forma similar, a dureza superficial aumentou com a redução do avanço; nesta situação, o material é repetidamente sujeito à deformação plástica, causando mais encruamento e maior dureza. Além disso, constatou-se que o aumento do número de passes elevou a profundidade da camada encruada, melhorou o acabamento e teve o mesmo efeito que o aumento da pressão sobre a deformação da camada subsuperficial.

No estudo realizado por BLASÓN *et al.* [14] com dois aços-liga de microestrutura ferrítico-perlítica, um com 0,38% e outro com 0,44% de carbono, a análise da camada subsuperficial não indicou a presença de uma pronunciada distorção de grãos no aço de maior teor de carbono. Isso indica que a força de roleteamento não foi suficiente para causar uma deformação plástica considerável na camada subsuperficial do material, o que pode ser explicado por sua maior resistência ao escoamento (725 contra 529 MPa); a deformação plástica subsuperficial depende da relação entre a força de roleteamento e a dureza ou o limite de escoamento do material roleteado.

No aço DIN 20Cr4, KUZNETSOV *et al.* [15] encontraram que o aumento do número de passes de roleteamento de quatro para oito prejudicou significativamente a superfície, com ela passando a exibir características de adesão, transferência e destacamento de material. Além disso, os autores verificaram que o aumento da força de roleteamento deteriorou significativamente a superfície já que forças excessivamente altas induzem instabilidade de cisalhamento na camada subsuperficial que resulta em danos e irregularidades superficiais. Por fim, verificou-se uma alteração da microestrutura subsuperficial após o roleteamento, as agulhas de martensita presentes foram substituídas por uma microestrutura nanocristalina induzida por deformação.

Em seu trabalho com o aço AISI 1045, SALDAÑA-ROBLES *et al.* [16] observaram uma interação significativa entre força e avanço de roleteamento sobre Ra e que, individualmente, a força apresentou a maior influência sobre Ra, seguida pelo avanço; a velocidade de roleteamento, por sua vez, não apresentou influência significativa sobre Ra. Além disso, observou-se que a redução do avanço e a elevação da força causaram uma redução significativa de Ra na superfície roleteada, chegando a uma redução de 83%. Em relação à dureza superficial, apenas a força de roleteamento apresentou influência significativa e um aumento de cerca de 14% na dureza superficial foi observado com o roleteamento.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de alguns parâmetros de roleteamento (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre determinadas características da superfície e da camada subsuperficial (rugosidade, microdureza superficial e subsuperficial e microestrutura) de espécimes do aço ABNT 1020. Pretende-se com isso conhecer o comportamento mecânico do aço ABNT 1020, material comumente utilizado em componentes sujeitos à fadiga, como eixos e engrenagens, ao ser submetido ao processo de roleteamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O aço ABNT 1020, adquirido na forma de barras cilíndricas, foi submetido ao tratamento térmico de recozimento pleno sem atmosfera controlada em que o material foi aquecido até 880°C em um forno elétrico Magnus modelo N1040 e mantido nessa temperatura por três horas para a eliminação dos efeitos do processamento anterior sobre sua microestrutura. A Figura 1 mostra a microestrutura do material após o recozimento. Nota-se que sua microestrutura recozida é composta por uma matriz contínua de ferrita pró-eutetóide que envolve colônias isoladas de perlita, característica de um aço hipoeutetóide.

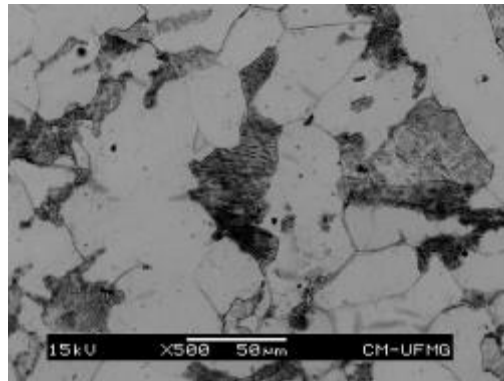


Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 1020 após o recozimento pleno.

Em seguida, as barras foram torneadas na forma dos corpos de prova (Figura 2), que possuem um formato cilíndrico com 100 mm de comprimento dividido em duas regiões distintas, uma com comprimento de 24 mm e diâmetro de 11 mm e outra com 76 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro, onde se encontra a região a ser roleteada. Isso foi feito em um torno CNC com 5,5 kW de potência e rotação máxima de 3500 rpm, usando insertos da classe Mitsubishi Carbide VCMT 160408 UE6110 (metal duro classe ISO P10 com revestimento de TiCN-Al₂O₃-Composto de Ti) e um suporte código ISO SVVCN 2020-K16N do mesmo fabricante. A condição empregada na usinagem foi: velocidade de corte de 79 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,675 mm.

O roleteamento da superfície indicada pela área hachurada da Figura 2 foi feito no mesmo torno, fixando-se nele uma ferramenta de roleteamento Ecoroll modelo HG6-20-003.0-012.5-SL20-R. A Figura 3 mostra uma representação esquemática do processo de roleteamento e a ferramenta de roleteamento montada no torno.

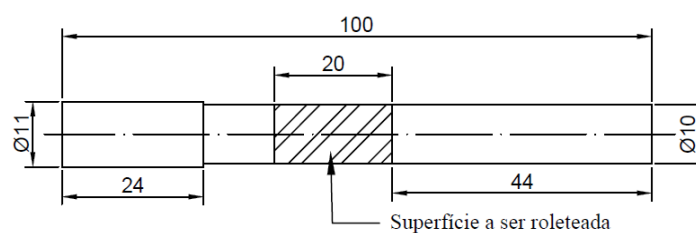


Figura 2: Desenho do corpo de prova de aço ABNT 1020 com a superfície roleteada indicada pela área hachurada.

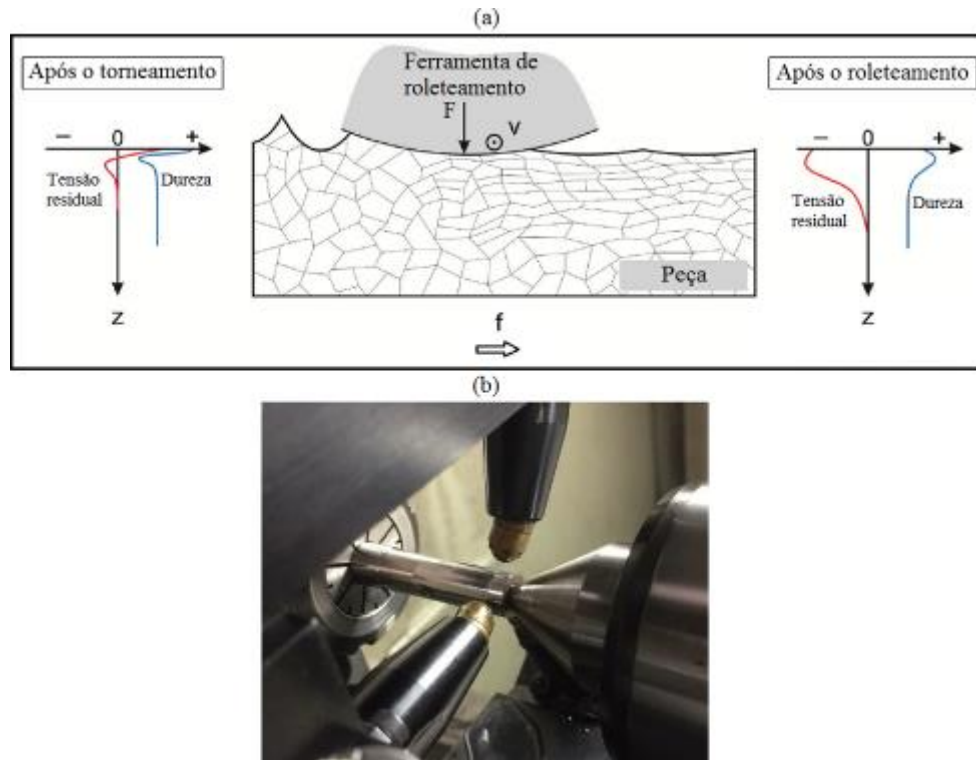


Figura 3: (a) Parâmetros de roleteamento, velocidade: (V), avanço (f) e força (F), e os efeitos usuais do roleteamento sobre o acabamento superficial, os perfis de dureza e tensão residual abaixo da superfície e a microestrutura da camada subsuperficial e (b) montagem da ferramenta de roleteamento no torno.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de roleteamento testados e seus níveis. Ressalta-se que, durante a variação de cada parâmetro, os demais permaneceram constantes (valores em negrito). Por exemplo, para o estudo da influência da variação da pressão de roleteamento (P), velocidade, avanço e número de passes foram mantidos constantes em $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$, respectivamente. Com esse procedimento experimental, foram realizados 13 ensaios de roleteamento, sem réplicas. Além disso, um corpo de prova apenas torneado foi avaliado para fins comparativos. Esta amostra será representada por $P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$.

Tabela 1: Parâmetros de roleteamento testados.

PRESSÃO (P) [bar]	VELOCIDADE (V) [m/min]	AVANÇO (f) [mm/rev]	NÚMERO DE PASSES (n)
40	30	0,04	1
80	50	0,08	2
120	70	0,12	3
160	90	0,16	5

A medição de rugosidade dos corpos de prova foi feita utilizando-se um perfilômetro Hommelwerke T8000 com o apalpador TKU300 e a ponta 231289 5/90 e, em cada corpo de prova, foram realizadas três medições defasadas em 120° ao longo da circunferência. Para a varredura da superfície, utilizou-se o *software* Turbo Wave v7.55 e para a análise dos dados coletados foi utilizado o *software* Hommelmap Expert v6.2. Foram avaliados os parâmetros altura máxima do pico do perfil (R_p) e profundidade máxima do vale do perfil (R_v), cujo somatório corresponde à altura máxima do perfil (R_z). As medições de microdureza superficial e subsuperficial foram realizadas para condições selecionadas da Tabela 1 com o objetivo de mostrar separadamente a influência de cada parâmetro de roleteamento, além de comparar com o corpo de prova apenas torneado. Empregou-se nestas medições um microdurômetro Mitutoyo MVK-H1 com indentador Vickers e aplicou-se uma carga de 200 g durante 15 s. No caso da microdureza superficial, foram feitas medições em três pontos defasados em 120° ao longo da circunferência de cada corpo de prova. Já na camada subsuperficial as medições de microdureza foram feitas até que uma profundidade mínima de 1,2 mm fosse coberta

pelas medições em todos os corpos de prova. A preparação metalográfica das seções dos corpos de prova foi realizada por meio do lixamento e polimento em politrizes metalográficas (lixas com granulometria 240, 400, 600 e 1200, pasta de diamante com diâmetro médio de 3 μm e solução de alumina com diâmetro médio de 1 μm). Por fim, a análise metalográfica para a caracterização do material e estudo da camada subsuperficial foi realizada com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL modelo GSM 6260 LV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos na medição da rugosidade e da microdureza superficial e subsuperficial e da análise metalográfica da camada subsuperficial.

3.1 Rugosidade

A Figura 4 apresenta o comportamento da altura máxima do pico do perfil (R_p) e da profundidade máxima do vale do perfil (R_v) da superfície dos corpos de prova variando-se a pressão, a velocidade, o avanço e o número de passes segundo a Tabela 1 e incluindo os dados da superfície apenas torneada ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$).

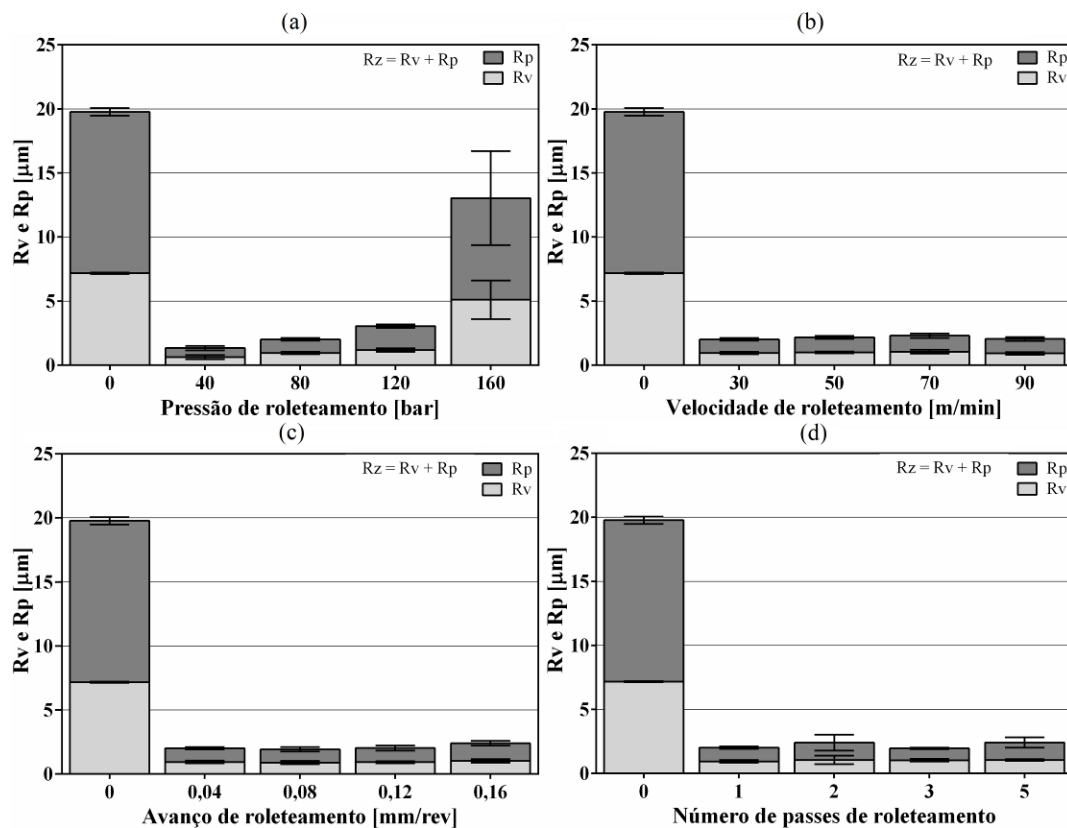


Figura 4: Influência dos parâmetros de roleteamento sobre a altura máxima do pico do perfil (R_p) e a profundidade máxima do vale do perfil (R_v) de corpos de prova do aço ABNT 1020: (a) pressão, (b) velocidade, (c) avanço e (d) número de passes.

A Figura 4 mostra que o roleteamento promove uma redução acentuada de R_p e R_v e que os menores valores ocorrem no roleteamento com 40 bar, 30 m/min, 0,04 mm/rev e um passe. Neste caso, os valores médios de R_p e R_v foram reduzidos em 94,35% e 91,42%, respectivamente, em relação ao corpo de prova apenas torneado. Esta melhora é explicada pela deformação plástica: material é deslocado dos picos em direção aos vales e, dessa forma, a altura dos picos é reduzida em função do seu achatamento e a profundidade dos vales também é reduzida como resultado do seu preenchimento com material deslocado dos picos.

A Figura 4(a) mostra que aumento da pressão de roleteamento causou um aumento significativo de R_p e R_v . Esses resultados indicam que o volume de material deslocado com o aumento da pressão passou a preencher os vales para além da linha média, formando picos de maior altura. Além disso, conforme afirmado por GHARBI *et al.* [11] e EL-AXIR [9], falhas por cisalhamento na camada subsuperficial também podem

justificar o aumento da rugosidade com a elevação da pressão; forças altas demais induzem instabilidade de cisalhamento na camada subsuperficial que resulta na sua descamação e, conseqüentemente, em danos e irregularidades superficiais. Por fim, constata-se que a pressão teve o efeito mais dominante sobre a rugosidade.

Na Figura 4(b) verifica-se que a velocidade não apresentou influência significativa sobre R_p ou R_v , mesma situação encontrada com o número de passes (Figura 4d). Quando se avaliou a influência do avanço de roleteamento (Figura 4c), foi constatada uma variação significativa apenas em R_p . O aumento de R_p na superfície roleteada com a elevação do avanço pode ser explicado pelo fato de que, ao se utilizar um avanço mais alto, tem-se uma redução da sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas de roleteamento, o que leva a um menor achatamento do perfil. Além disso, o avanço que produziu R_p mais alto foi o de 0,16 mm/rev, avanço maior que o utilizado no torneamento prévio (0,15 mm/rev); neste caso, as esferas não foram capazes de achatar os picos e preencher os vales de rugosidade e passaram a aumentar os picos já existentes.

3.2 Microdureza superficial

A Figura 5 apresenta a influência dos parâmetros de roleteamento estudados (pressão, velocidade, avanço e número de passes) sobre a microdureza superficial, apresentando-se adicionalmente os dados referentes à superfície apenas torneada ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$).

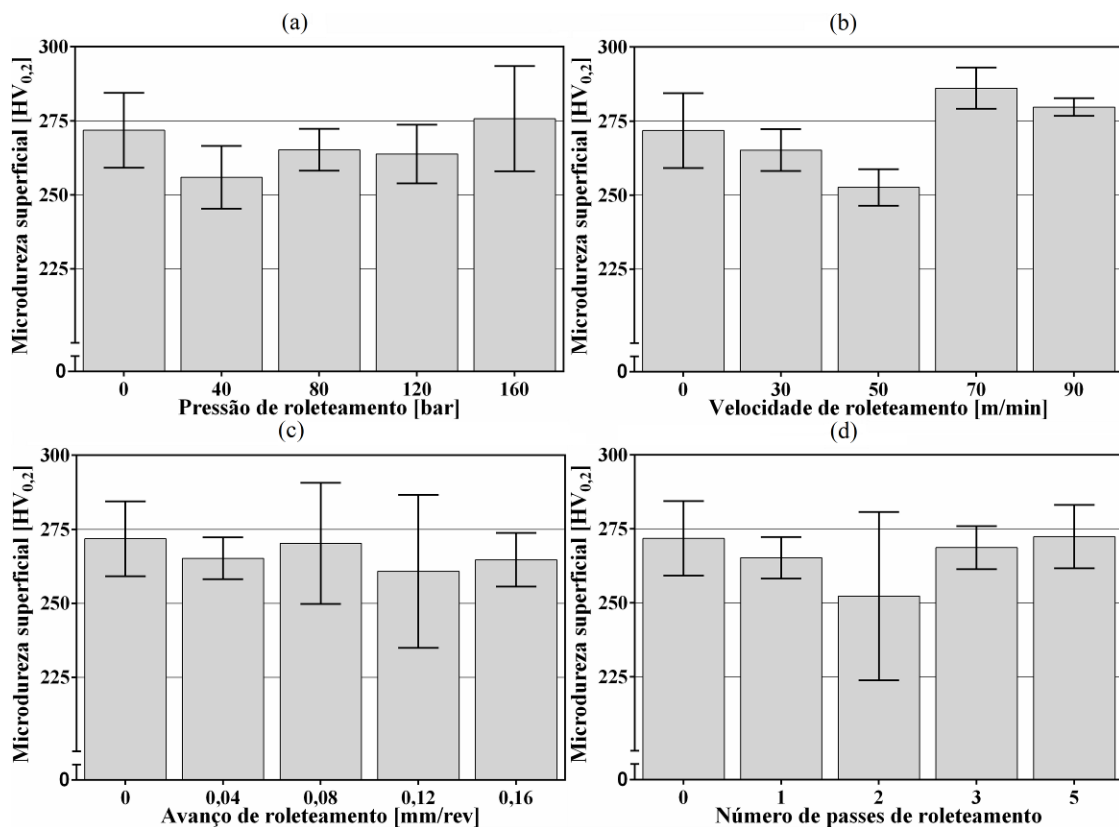


Figura 5: Influência dos parâmetros de roleteamento sobre a sobre a microdureza da superfície de corpos de prova do aço ABNT 1020: (a) pressão, (b) velocidade, (c) avanço e (d) número de passes.

Considerando a dispersão dos dados, verifica-se na Figura 5(a) que a pressão de roleteamento não teve influência significativa sobre a microdureza superficial, mesma situação encontrada com o avanço (Figura 5c) e com o número de passes de roleteamento (Figura 5d). Por outro lado, conforme mostrado na Figura 5(b), o aumento da velocidade até 50 m/min causou uma redução da microdureza superficial, mas apenas com 50 m/min a redução foi significativa. Posteriormente, porém, a microdureza superficial foi elevada até o patamar inicial com o aumento da velocidade para 70 m/min e mantida lá com o aumento adicional para 90 m/min. A redução ou a manutenção da microdureza superficial antes e após o roleteamento podem estar associadas a uma maior uniformização ou homogeneização das deslocações induzidas previamente na superfície pelo torneamento.

3.3 Perfil de microdureza abaixo da superfície

Os resultados da microdureza subsuperficial são apresentados na Figura 6. Os perfis referentes à condição apenas torneada ($P = 0$ bar, $V = 0$ m/min, $f = 0$ mm/rev e $n = 0$), representado por linhas pontilhadas, e à roleteada com $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$ (linhas tracejadas) estão replicados em todos os gráficos para a análise comparativa dos parâmetros individuais.

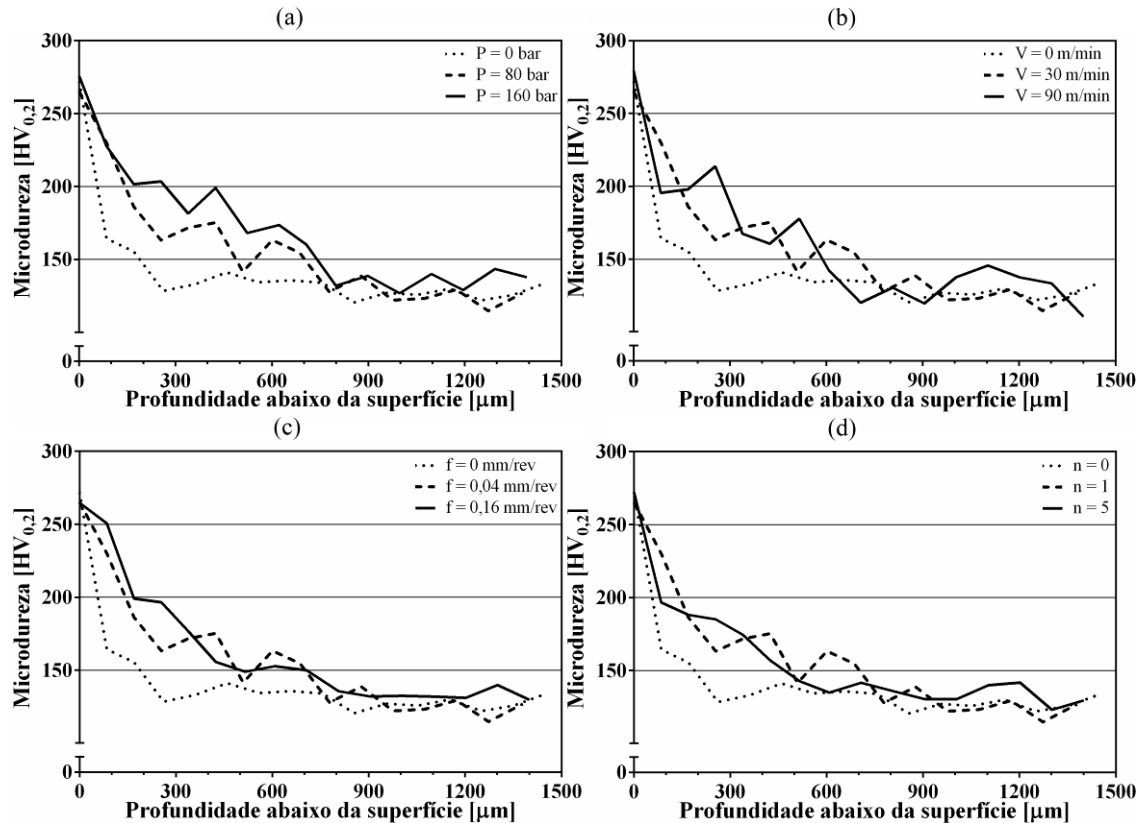


Figura 6: Influência dos parâmetros de roleteamento sobre o perfil de microdureza da camada subsuperficial de corpos de prova do aço ABNT 1020: (a) pressão, (b) velocidade, (c) avanço e (d) número de passes.

O perfil de microdureza do corpo de prova apenas torneado apresentado na Figura 6 mostra que o próprio torneamento causa uma elevação da microdureza de uma camada próxima à superfície em relação à microdureza do núcleo do material. Pode-se observar que esse perfil se torna aproximadamente constante e com valor médio em torno de $130 \text{ HV}_{0,2}$ a uma profundidade de $300 \mu\text{m}$. Na condição de $P = 80$ bar, $V = 30$ m/min, $f = 0,04$ mm/rev e $n = 1$, observa-se um aumento dos valores de microdureza até uma profundidade aproximada de $800 \mu\text{m}$, a partir da qual eles se tornam aproximadamente constantes e próximos de $130 \text{ HV}_{0,2}$. Constata-se, assim, que o roleteamento causou uma elevação da microdureza da camada subsuperficial e que a camada subsuperficial deformada plasticamente foi ampliada, atingindo a espessura aproximada de $800 \mu\text{m}$.

Em relação à influência da elevação da pressão de roleteamento, avaliada na Figura 6(a), observa-se que a aplicação de 160 bar causou uma elevação da microdureza a partir da profundidade aproximada de $200 \mu\text{m}$ até ela se tornar aproximadamente constante e muito próxima da microdureza do material bruto na profundidade aproximada de $800 \mu\text{m}$, a mesma verificada com 80 bar. A Figura 6(b) mostra o efeito da velocidade de roleteamento e nela se verifica que o aumento da velocidade para 90 m/min não causa uma alteração significativa da microdureza subsuperficial em relação à encontrada com 30 m/min e a profundidade afetada se mantém em torno de $800 \mu\text{m}$. Conforme mostrado na Figura 6(c), o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev provocou uma leve elevação dos níveis de microdureza até a profundidade de $350 \mu\text{m}$, a partir da qual nenhuma diferença consistente é observada. A curva de microdureza subsuperficial indica a manutenção da espessura afetada em torno de $800 \mu\text{m}$. O perfil de microdureza referente à aplicação de cinco passes de roleteamento, apresentado na Figura 6(d), indica que, com o aumento do número de passes, ocorre uma leve redução da microdureza subsuperficial. Além disso, observa-se que ocorreu uma redução da espessura afetada para aproximadamente $600 \mu\text{m}$.

O aumento da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada pelo roleteamento com a utilização de pressões maiores pode ser explicado pela indução de deslocações adicionais com o aumento da intensidade da deformação plástica imposta ao material. A redução da microdureza e da profundidade afetada com o aumento do número de passes para cinco pode ser explicada por uma maior uniformização das deslocações da camada subsuperficial e também pela ocorrência de descamação da camada subsuperficial, visto que esse material possui baixa resistência mecânica.

3.4 Análise microestrutural

Com as imagens da análise metalográfica apresentadas na Figura 7, avaliou-se a influência do roleteamento sobre a microestrutura da camada subsuperficial dos corpos de prova de aço ABNT 1020 recozido, sob diferentes ampliações.

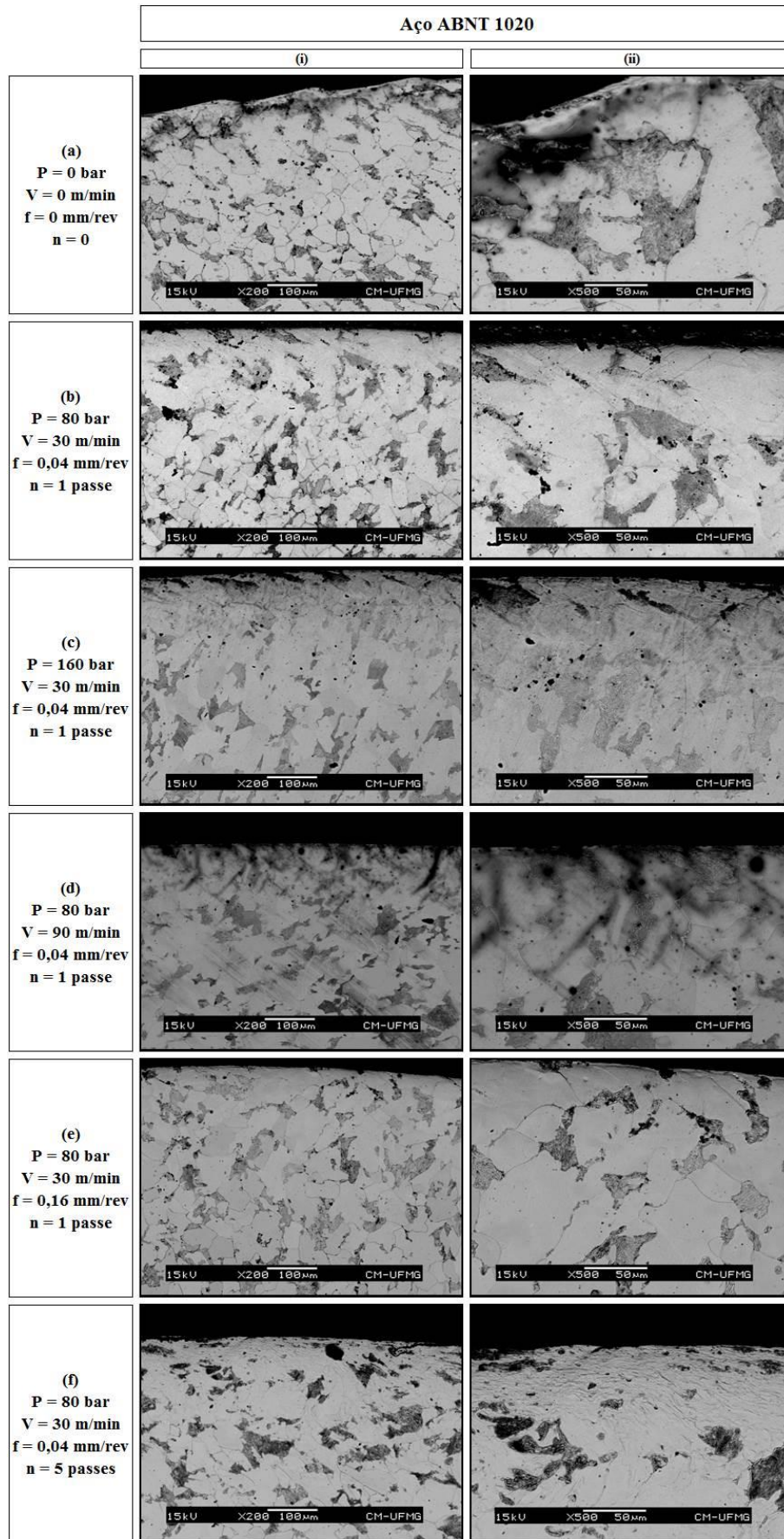


Figura 7: Microestrutura da camada subsuperficial de corpos de prova do aço ABNT 1020 submetidos ao torneamento e a condições selecionadas de roleteamento.

Na camada subsuperficial do corpo de prova apenas torneado (Figura 7a), pode-se verificar as marcas de avanço provenientes do torneamento e também que a microestrutura não apresenta sinais de deformação. Após o roleteamento sob pressão de 80 bar, constata-se na Figura 7(b) uma leve deformação da camada subsuperficial, evidenciada pela ausência das marcas de avanço e dos contornos de grão até cerca de 200 μm . O aumento da pressão para 160 bar, por sua vez, conforme mostrado na Figura 7(c), causou um aumento mais evidente da deformação da microestrutura, demonstrada principalmente pela perturbação e fratura de lamelas de cementita.

Comparando-se a Figura 7(b) com a Figura 7(d), verifica-se que a elevação da velocidade de roleteamento de 30 para 90 m/min causou uma leve redução da intensidade da deformação da camada subsuperficial. As colônias de perlita se mostram muito semelhantes, porém verifica-se uma definição dos contornos de grão na camada subsuperficial roleteada com 90 m/min que não é observada na roleteada com 30 m/min, situação explicada pela redução da deformação imposta sobre ela.

Em relação ao efeito da elevação do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev, observa-se uma situação similar à encontrada com a elevação da velocidade. Ao se comparar a Figura 7(b) com a Figura 7(e), nenhuma diferença notável é observada entre as estruturas de perlita, porém, com 0,16 mm/rev, a microestrutura possui contornos de grão mais definidos, indicando que ela sofreu menos deformação.

Avaliando-se a influência do aumento de um para cinco passes de roleteamento pela análise da Figura 7(b) e da Figura 7(f), constata-se que a microestrutura da camada subsuperficial passou a apresentar uma deformação muito mais severa, principalmente até uma profundidade aproximada de 200 μm . As colônias de perlita da camada subsuperficial submetida a cinco passes apresentam uma estrutura fortemente perturbada e fraturada. Além disso, nota-se, comparando a Figura 7(c) e a Figura 7(f), que a elevação do número de passes afetou muito mais a microestrutura da camada subsuperficial do que a elevação da pressão.

O aumento da deformação plástica da camada subsuperficial como resultado do aumento da pressão é causado pelo aumento da intensidade das tensões de Hertz induzidas pelo roleteamento, visto que estas aumentam com a elevação da intensidade da força normal aplicada no contato [17]. Por outro lado, a redução da intensidade da deformação da camada subsuperficial com o aumento da velocidade de 30 para 90 m/min pode ser justificada pela redução do tempo de contato entre as esferas da ferramenta e o material. A elevação da velocidade de roleteamento provocou uma redução do tempo de contato entre a ferramenta de roleteamento e a superfície dos corpos de prova. Com isto, pode ocorrer uma redução da deformação imposta ao material da camada subsuperficial. A observada redução da intensidade da deformação da camada subsuperficial com o aumento do avanço de roleteamento de 0,04 para 0,16 mm/rev pode ser justificada pela redução da sobreposição da deformação conferida pelas esferas da ferramenta. Em relação à influência da elevação do número de passes de um para cinco, o aumento da intensidade da deformação pode ser atribuído ao acúmulo da deformação imposta à camada subsuperficial em cada passe da ferramenta.

4. CONCLUSÕES

Após a apresentação e a análise dos resultados obtidos neste estudo pode-se concluir que:

- Qualquer condição de roleteamento, especialmente sob pressão de 40 bar, reduziu significativamente os parâmetros de rugosidade R_p e R_v obtidos na superfície apenas torneada. A pressão de roleteamento foi o parâmetro de maior influência sobre o acabamento e seu aumento elevou os parâmetros de rugosidade medidos. A velocidade e o número de passes de roleteamento, por outro lado, não tiveram influência significativa sobre o acabamento resultante do processo. Além disso, o aumento do avanço para 0,16 mm/rev, avanço superior ao do torneamento prévio (0,15 mm/rev), prejudicou o acabamento em razão da redução da sobreposição das marcas sucessivas das esferas de roleteamento.
- O roleteamento promoveu apenas manutenção ou redução da microdureza superficial, o que pode ser explicado pela maior uniformização das deslocamentos induzidas na superfície pelo torneamento prévio.
- O roleteamento, sob qualquer condição, promoveu uma considerável elevação da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada. O aumento da pressão de roleteamento causou uma elevação da microdureza subsuperficial como resultado do aumento do encruamento da camada subsuperficial. O aumento da velocidade de roleteamento não provocou alteração da microdureza e da profundidade afetada. Com a elevação do avanço de roleteamento, observou-se uma pequena elevação da microdureza subsuperficial enquanto a profundidade afetada se manteve aproximadamente constante. Por fim, o aumento do número de passes de roleteamento levou a uma redução da microdureza e da profundidade da camada subsuperficial afetada, explicada por uma maior uniformização das deslocamentos previamente induzidas nela.
- O aumento da deformação da camada subsuperficial foi observado com a elevação da pressão de

roleteamento. A elevação da velocidade de roleteamento provocou uma redução da deformação, que pode ser explicada por uma redução do tempo de contato entre as esferas e a superfície. Uma redução da intensidade de deformação também foi encontrada quando se elevou o avanço em função da redução da sobreposição entre as marcas sucessivas das esferas de roleteamento. Com a elevação do número de passes de roleteamento, foi observado um aumento da intensidade da deformação da camada subsuperficial. Além disso, a elevação do número de passes causou uma deformação muito mais intensa do que a verificada quando se aumentou a pressão.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e também por intermédio do programa BRAGECRIM - Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura (projeto 029/14). Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG pelo apoio à realização deste projeto, à professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pela disponibilização do Laboratório de Tratamentos Térmicos e orientações e à professora Geralda Cristina Durães de Godoy do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG pela disponibilização do Laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais. Experimentos e análises envolvendo microscopia eletrônica foram realizados no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil (<http://www.microscopia.ufmg.br>).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTAKHOV, V.P., PETROPOULOS, G.P., PANDAZARAS C.N., *et al.*, *Surface integrity in machining*, 1 ed., London, Springer-Verlag, 2010.
- [2] BANNANTINE, J.A., COMER, J.J., HANDROCK, J.L., *Fundamentals of metal fatigue analysis*, 1 ed., Englewood, Prentice Hall, 1989.
- [3] COURTNEY, T.H., *Mechanical behavior of materials*, 2 ed., Long Grove, Waveland Press, Inc., 2005.
- [4] STOUT, K. J., “Engineering surfaces - A philosophy of manufacture (a proposal for good manufacturing practice)”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 212, n. 3, pp. 169–174, March 1998.
- [5] WONG, C.C., HARTAWAN, A., TEO, W.K., “Deep cold rolling of features on aero-engine components”, *Procedia CIRP*, v. 13, pp. 350-354, 2014.
- [6] SARTKULVANICH, P., Determination of materials properties for use in FEM simulations of machining and roller burnishing, Tese de D.Sc., The Ohio State University, Columbus, 2007.
- [7] KLOCKE, F., LIERMANN, J. “Roller burnishing of hard turned surfaces”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 38, n. 5-6, pp. 419-423, 1998.
- [8] ABRÃO, A.M., DENKENA, B., KÖHLER, J., *et al.*, “The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel”, *Procedia CIRP*, v. 13, pp. 31-36, 2014.
- [9] EL-AXIR, M.H., “An investigation into roller burnishing”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 40, n. 11, pp.1603-1617, Sep. 2000.
- [10] SEEMIKERI, C.Y., BRAHMANKAR, P.K., MAHAGAONKAR, S.B., “Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool”, *Tribology International*, v. 41, n. 8, pp. 724 - 734, Aug. 2008.
- [11] GHARBI, F., SGHAIER, S., AL-FADHALAH, K.J. *et al.*, “Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 20, n. 6, pp. 903-910, 2011.
- [12] RODRÍGUEZ, A., LÓPEZ DE LACALLE, L.N., CELAYA, A. *et al.*, “Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique”, *Surface and Coatings Technology*, v. 206, n. 11-12, pp. 2817-2824, Feb. 2012.
- [13] MORIMOTO, T., “Work hardening and tool surface damage in burnishing”, *Wear*, v. 127, n. 2, pp. 149-159, Oct. 1988.
- [14] BLASÓN, S., RODRÍGUEZ, C., BELZUNCE, J. *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, pp. 223-228, Dec. 2017.

- [15] KUZNETSOV, V. P., TARASOV, S. Y., DMITRIEV, A. I., “Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 217, pp. 327-335, Mar. 2015.
- [16] SALDAÑA-ROBLES, A., PLASCENCIA-MORA, H., AGUILERA-GÓMEZ, E. *et al.*, “Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel”, *Surface & Coatings Technology*, v. 339, pp. 191-198, Apr. 2018.
- [17] HUTCHINGS, I., SHIPWAY, P., *Tribology: Friction and wear of engineering materials*, 2 ed., Cambridge, Butterworth-Heinemann, 2017.

ORCID

Filipe Figueiredo dos Santos	https://orcid.org/0000-0002-5266-7670
Sandro da Costa Silva	https://orcid.org/0000-0001-8190-3217
Alexandre Mendes Abrão	https://orcid.org/0000-0003-2015-4077
Berend Denkena	https://orcid.org/0000-0001-9763-6248
Bernd Breidenstein	https://orcid.org/0000-0001-8899-9100
Kolja Meyer	https://orcid.org/0000-0003-1384-5961