

2019
São Carlos - SP



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE DO AÇO ENDURECIDO SAE 52100 APÓS RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL

Raphael Lima de Paiva^{1,2}

Rosemar Batista da Silva²

¹Universidade Federal do Piauí – UFPI, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, s/n - Ininga, Teresina - PI, 64049-550

²Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38408-100

raphaellimap@ufpi.edu.br

rosemar.silva@ufu.br

Resumo. A retificação é um processo de usinagem normalmente aplicado para conferir combinação de baixos desvios geométricos e dimensionais em peças previamente usinadas. No entanto, devido ao alto calor gerado durante o processo de retificação com rebolo convencional e ao fato de que a maior parte deste calor é conduzido para a peça, existe a possibilidade de geração de danos de origem térmica na mesma, o que pode levar ao seu descarte e causar prejuízos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a integridade superficial do aço endurecido SAE 52100 após retificação plana tangencial com rebolo convencional de óxido de alumínio branco. Duas condições de atmosfera de corte foram utilizadas: condição a seco e com fluido de corte aplicado pela técnica convencional. A penetração de trabalho também foi variada: 10 μm e 30 μm . A integridade de superfície da peça foi analisada em termos de rugosidade (parâmetro Ra), microdureza abaixo da superfície retificada e imagens obtidas por microscopia óptica da superfície usinada. Como resultados foram obtidos baixos valores de rugosidade, independente das condições de atmosfera de corte e penetração de trabalho. Contudo, a aplicação de fluido de corte foi fundamental para amenizar tanto o dano térmico visível causado na peça devido ao processo de retificação, quanto na variação de dureza abaixo da superfície usinada.

Palavras chave: Retificação. Aço SAE 52100. Fluido de corte. Penetração de Trabalho. Rugosidade Superficial. Microdureza.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão geralmente utilizado para conferir tolerâncias dimensionais estreitas e acabamento superficial fino nas peças (Stephenson e Agapiou, 2016). Por ser um processo de acabamento, a escolha correta dos parâmetros de corte neste processo é essencial para evitar qualquer tipo de dano à peça de trabalho.

Por conta das elevadas velocidades de corte empregadas no processo (superiores a 1800 m/min) e baixa taxa de remoção de material, a retificação é conhecida por possuir elevada energia específica de corte, até 7 vezes maior que processos como torneamento, fresamento e furação, considerando a usinagem de aço carbono em geral (Boothroyd e Knight, 2006). Um dos desafios do processo de retificação é que a maior parte de toda essa energia gasta no processo de retificação é transformada em calor e, de acordo com Klocke (2009), dependendo dos parâmetros de corte, até 85% do calor gerado é conduzido para a peça quando se emprega rebolos com abrasivos convencionais. Tal quantidade de calor pode acarretar o desenvolvimento de temperaturas altas o suficiente para danificar a integridade superficial e subsuperficial da peça.

De acordo com Malkin e Guo (2008), os principais danos térmicos na retificação são a queima (oxidação da superfície), transformação de fase, tensões residuais de tração e trincas. Ainda de acordo com os autores, na retificação de aços endurecidos, mesmo sem a presença de uma queima visível na peça, geralmente existe uma diminuição de dureza do material em regiões próximas à superfície retificada, por consequência de um revenimento excessivo provocado pelas altas temperaturas na zona de corte. Em casos extremos, a temperatura na zona de corte pode ser alta o bastante para provocar uma transformação de fase do material, levando a um aumento de dureza (formação de martensita não revenida) logo abaixo da superfície retificada conforme observado por Judong et al. (2012).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a integridade superficial do aço endurecido SAE 52100 após retificação plana tangencial com rebolo convencional de Al_2O_3 e sob diferentes condições de corte, incluindo duas atmosferas de corte e duas penetrações de trabalho. A integridade superficial da peça após retificação foi analisada em termos de rugosidade, microdureza abaixo da superfície retificada e imagens via microscopia óptica da superfície usinada.

2. METODOLOGIA

Os ensaios experimentais de retificação foram realizados em uma retificadora plana tangencial MELLO, modelo P36, que possui potência do motor elétrico do eixo árvore de 2,24 kW e rotação fixa de 2400 rpm. O rebolo utilizado em todos os ensaios foi o do tipo reto de óxido de alumínio branco (Al_2O_3), de especificação AA46K6V e dimensões de 297 mm x 25 mm x 76 mm (diâmetro externo x largura x diâmetro interno). O material da peça foi o aço endurecido SAE 52100, com dureza média de 62 HRC, cujas amostras foram preparadas e resultaram em geometria cilíndrica com 18 mm de diâmetro e 19 mm de altura.

Os parâmetros de entrada utilizados foram: velocidade de corte (V_s) de 37 m/s, velocidade da peça (V_w) de 3 m/min, e penetração de trabalho (a_e) variada em dois níveis: 10 e 30 μ m. Cada ensaio consistiu na remoção de uma altura equivalente à penetração de trabalho em passagens com avanço transversal com profundidade de corte (a_p) de 0,9 mm, conforme ilustrado na Figura 1.

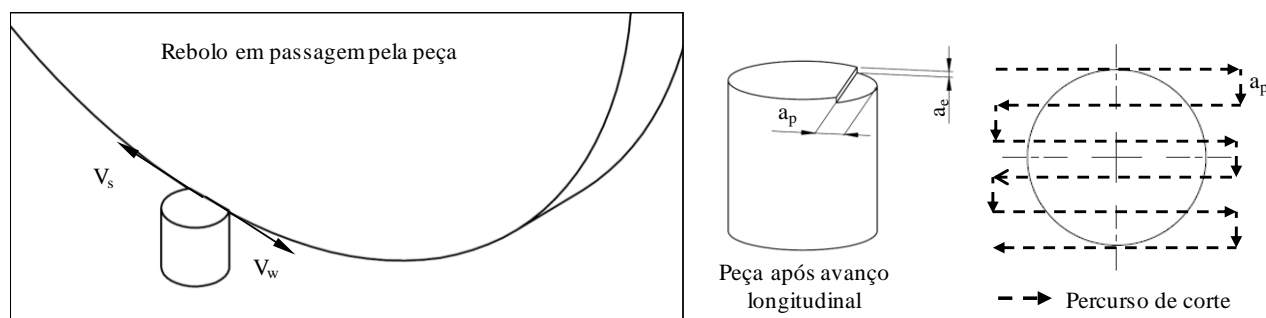


Figura 1. Ilustração do sentido de corte e avanços longitudinal e transversal empregados nos ensaios experimentais.

Duas atmosferas de corte foram avaliadas: a seco e com fluido de corte aplicado pela técnica convencional a uma vazão de 9 L/min, com o bocal na posição tangente ao rebolo. O fluido de corte utilizado foi o semissintético de base vegetal VASCO 7000, da fabricante Blaser Siwsslube, com uma diluição na proporção de 1:19. Para cada condição foi realizada uma réplica, totalizando, portanto, oito (8) ensaios experimentais.

Antes de cada ensaio o rebolo foi dressado com um dressador de diamante do tipo ponta única (raio de ponta de 0,3 mm), com penetração de dressagem $a_{ed} = 15 \mu$ m, velocidade de dressagem $V_d = 140$ mm/min, conferindo um grau de recobrimento do rebolo (U_d) igual a 3.

Os parâmetros de saída utilizados para analisar a integridade de superfície da peça foram: rugosidade (parâmetro R_a), microdureza abaixo da superfície retificada e imagens obtidas por microscopia óptica da superfície usinada. A rugosidade da superfície foi medida com o auxílio de um rugosímetro portátil modelo SJ-201P, Mitutoyo, com cut-off de 0,8 mm. Cinco medições foram realizadas em cada superfície retificada, sempre na direção perpendicular ao avanço longitudinal do rebolo. Ao final foram calculadas a média aritmética e desvio-padrão dessas cinco medições.

A microdureza abaixo da superfície retificada foi medida após preparação metalográfica adequada com um microdurômetro HMV, da fabricante Shimadzu; em cada amostra foram realizados três (3) perfis de microdureza, com medições igualmente espaçadas de 20 μ m a partir da superfície retificada até 300 μ m, ou até não ser observada variação de dureza em relação à dureza antes do processo de retificação. Ao final foram calculadas a média aritmética e desvio-padrão dessas três medições. Os parâmetros utilizados nas medições de microdureza foram: microdureza Vickers com carga de 490,3 mN (HV 0,05) e tempo de aplicação de 15 segundos. Para a aquisição de imagem via microscopia óptica das superfícies retificadas foi utilizado um estereó-microscópio Olympus SZ61.

Na Tabela 1 é apresentado o resumo das condições de usinagem utilizadas neste trabalho.

Tabela 1. Condições de usinagem empregadas nos ensaios experimentais.

Máquina-ferramenta	P36, MELLO, 2,24 kW, 2400 rpm
Rebolo	Al_2O_3 – AA46K6V – \varnothing 297 mm
Dimensões das amostras	\varnothing 18 mm x 19 mm
Velocidade do rebolo (V_s)	37 m/s
Velocidade da peça (V_w)	3 m/min
Profundidade de corte (a_p)	0,9 mm
Penetração de trabalho (a_e)	10 μ m e 30 μ m
Atmosfera de corte	A seco
Fluido de corte (concentração)	Fluido de corte aplicado pela técnica convencional (9 L/min)
	Óleo semissintético de base vegetal VASCO 7000 (1:19)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 são mostrados os resultados de rugosidade (parâmetro Ra) em função da atmosfera de corte para as duas penetrações de trabalho utilizadas.

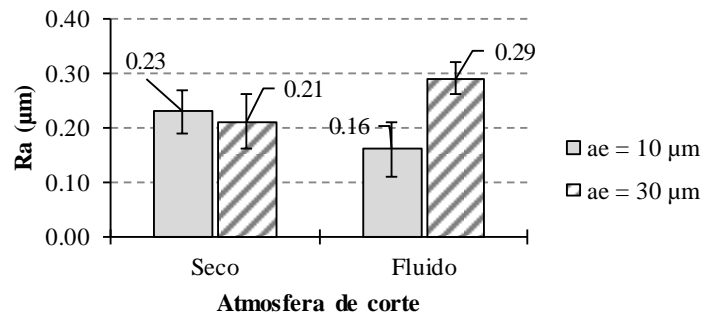


Figura 2. Rugosidade superficial em função da atmosfera de corte para ambas as penetrações de trabalho.

Conforme pode ser observado na Figura 2, todos os valores de rugosidade Ra obtidos estão entre 0,16 µm e 0,29 µm, faixa esta que indica que os resultados obtidos estão em conformidade com a rugosidade Ra esperada em processos de retificação, que varia entre 0,1 µm e 1,6 µm (Kalpakjian e Schmid, 2009).

Em relação à influência da atmosfera de corte nos resultados de rugosidade, observa-se ainda da Fig. 2 que, para a penetração de trabalho de 10 µm, a utilização de fluido de corte diminuiu em média o parâmetro Ra em 0,07 µm. Porém, ao usinar com a penetração de trabalho de 30 µm, o efeito foi contrário, apresentando um aumento no parâmetro Ra de 0,08 µm. Em relação à variação da penetração de trabalho, observa-se da Fig. 2 que, para a condição com fluido de corte, a rugosidade aumentou com a_e , comportamento este não observado para a condição a seco. Segundo Malkin e Guo (2008), ao aumentar a penetração de trabalho aumenta-se, também, a severidade do processo por conta da maior espessura de cavaco não deformado o que, conseqüentemente, pode afetar negativamente o acabamento superficial.

Na Figura 3 é mostrada a microdureza da peça em função da distância abaixo da superfície retificada, para as duas condições de atmosfera de corte, em que a linha "Ref." corresponde à dureza da peça antes do processo de retificação.

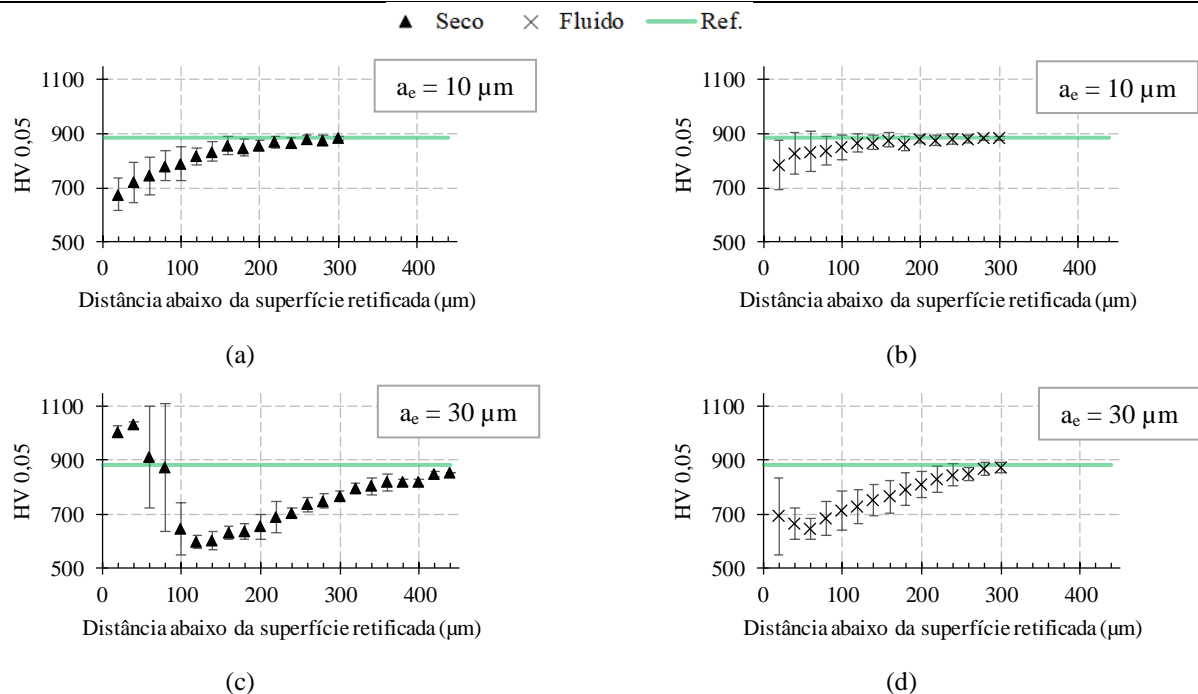


Figura 3. Microdureza em função da distância abaixo da superfície retificada para as condições (a) a seco e $a_e = 10 \mu\text{m}$, (b) fluido de corte e $a_e = 10 \mu\text{m}$, (c) a seco e $a_e = 30 \mu\text{m}$, (d) fluido de corte e $a_e = 30 \mu\text{m}$.

Como pode ser observado na Figura 3, todas as amostras apresentaram variação de dureza em regiões próximas à superfície retificada, independente da atmosfera e da penetração de trabalho empregados. Além disso, nota-se que a faixa em que há variação de dureza aumentou com a severidade do processo, isto é, com o aumento da penetração de trabalho e não utilização de fluido de corte. Para a menor penetração de trabalho, $a_e = 10 \mu\text{m}$, observou-se uma redução

na dureza do material que alcançou até 160 μm e 120 μm para as condições a seco [Fig. 3(a)] e com fluido de corte [Fig. 3(b)], respectivamente. Já ao empregar a condição mais severa de corte, $a_e = 30 \mu\text{m}$, a redução de dureza no material se estende até 420 μm e 280 μm para as condições a seco [Fig. 3(c)] e com fluido de corte [Fig. 3(d)], respectivamente. Esta faixa de variação de dureza abaixo da superfície retificada é comumente denominada de zona afetada pelo calor (ZAC). Portanto, para as condições utilizadas neste trabalho, a utilização de fluido de corte diminuiu a ZAC em 25% e 33% para $a_e = 10 \mu\text{m}$ e $30 \mu\text{m}$, respectivamente. Tais resultados mostram a importância do uso de fluido de corte no processo de retificação, principalmente em condições mais severas de corte, isto é, com maiores valores de penetração de trabalho.

Conforme mencionado anteriormente, a variação de dureza de aços endurecidos após processo de retificação é um fenômeno recorrente. A ação dos grãos abrasivos em contato com o material da peça resulta em uma intensa geração de calor localizado na interface rebolo-peça, calor este que é resultado do processo de formação de cavaco que inclui deformações elásticas, plásticas e ruptura do material durante o corte. Este calor gerado pode resultar no desenvolvimento de temperaturas altas o bastante para promover um tratamento térmico indesejado em regiões próximas à superfície retificada, dando origem então à ZAC. De acordo com Seidel et al. (2018), duas zonas afetadas pelo calor podem ser formadas nestes casos: uma zona de revenimento excessivo e uma zona de retêmpera (martensita não revenida). No primeiro caso, a ZAC é caracterizada pela diminuição na dureza do material, fenômeno este observado em todas as amostras retificadas neste trabalho com fluido de corte e na condição a seco com $a_e = 10 \mu\text{m}$, Fig. 3(a), (b) e (d), respectivamente. No segundo caso, a ZAC é caracterizada pelo aumento de dureza do material em relação à dureza antes do processo de retificação, fenômeno este observado apenas para a condição mais severa utilizada neste trabalho (a seco e $a_e = 30 \mu\text{m}$). Portanto, o aumento de dureza em regiões próximas da superfície retificada conforme observado na Fig. 3(c) indica a formação de martensita não revenida em até aproximadamente 80 μm abaixo da superfície retificada, o que sugere, além disso, que a temperatura durante o processo de retificação para esta condição foi superior à temperatura de austenitização do material nesta região em específico. Como a temperatura da peça durante o processo diminui a partir da superfície retificada, após a faixa com aumento de dureza é comum que a região logo abaixo da martensita não revenida sofra um revenimento excessivo, apresentando, portanto, uma diminuição de dureza, conforme observado na Fig. 3(c) a partir de 100 μm de distância da superfície retificada.

Assim como a ZAC, observa-se da Figura 3 que a variação de dureza também aumentou com a severidade do processo. Para a amostra retificada a seco e $a_e = 10 \mu\text{m}$ [Fig. 3(a)] a maior variação de dureza foi uma redução de 24%, observada a uma distância de 20 μm da superfície retificada. Quando o fluido de corte foi utilizado na retificação com a mesma penetração de trabalho [Fig. 3(b)], a maior variação foi uma redução de apenas 11% (também observada a uma distância de 20 μm). Para $a_e = 30 \mu\text{m}$, as maiores variações foram reduções de 32% (a 120 μm) e 27% (a 60 μm) para as condições a seco [Fig. 3(c)] e com fluido de corte [Fig. 3(d)], respectivamente.

Zhejun e Zhonghui (1989) analisaram a integridade superficial do aço endurecido SAE 52100 após retificação com rebolo de óxido de alumínio branco (Al_2O_3) com fluido de corte e a seco para duas penetrações de trabalho (5 μm e 20 μm). Para a condição de menor penetração, os autores observaram uma redução na microdureza abaixo da superfície retificada apenas para a condição a seco. No entanto, após retificação com penetração de trabalho de 20 μm , houve redução de dureza abaixo da superfície retificada para ambas as condições de atmosfera de corte, principalmente para a condição a seco. Judong et al. (2012) relataram a presença de uma região completamente endurecida (martensita não revenida) após retificação plana tangencial do aço SAE 1060 com rebolo de Al_2O_3 a seco. Os autores ainda observaram que tal região aumentou com a penetração de trabalho.

Na Figura 4 são mostradas as imagens via microscopia óptica das superfícies retificadas sob as diferentes condições de atmosfera de corte e penetração de trabalho utilizadas nos ensaios de retificação.

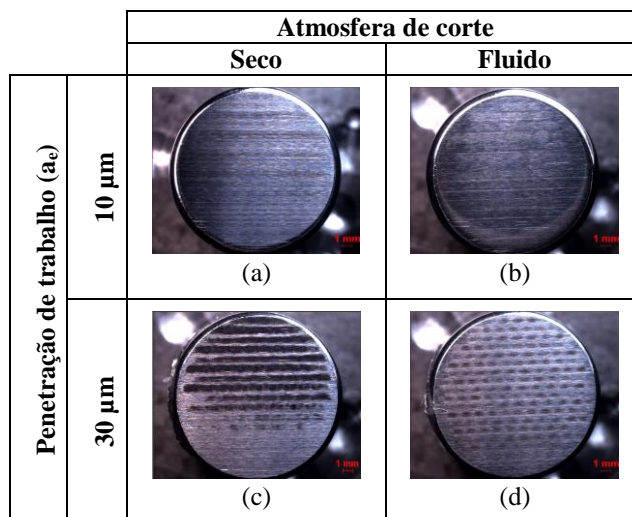


Figura 4. Imagens das superfícies retificadas.

Conforme pode ser observado na Figura 4, as amostras retificadas com a maior penetração de trabalho, $a_e = 30 \mu\text{m}$, apresentaram dano térmico superficial aparente com formação de óxidos bem definidos na superfície usinada, principalmente na condição a seco [Fig. 3(c)]. Por outro lado, ao empregar $a_e = 10 \mu\text{m}$ [Fig. 3(a) e (b)], não foi observado tal dano térmico aparente, o que não configura ausência de dano térmico, uma vez que os resultados de microdureza comprovaram alterações de dureza na subsuperfície das amostras usinadas nesta condição de corte.

4. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos dos ensaios experimentais de retificação plana tangencial realizados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- Foram observados baixos valores de rugosidade (parâmetro Ra) para todas as condições de retificação utilizadas, incluindo a condição a seco;
- Os resultados de microdureza abaixo da superfície retificada mostraram a presença de dano térmico para todas as condições de retificação utilizadas neste trabalho;
- Conforme esperado, a zona afetada pelo calor (ZAC) foi maior para a retificação na condição a seco. Além disso, a mesma aumentou com o aumento da penetração de trabalho;
- A amostra retificada a seco e com penetração de trabalho de $30 \mu\text{m}$ apresentou uma região de aumento de dureza até a distância de $80 \mu\text{m}$ abaixo da superfície retificada, o que sugere a formação de martensita não revenida nesta região;
- Em comparação à condição a seco, o uso de fluido de corte aplicado nas condições utilizadas neste trabalho reduziu a ZAC em até 33%;
- A variação de dureza foi maior para as condições a seco e aumentou com a penetração de trabalho;
- A ausência de queima visível na superfície retificada não configura ausência de dano térmico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem à CAPES, CNPQ e FAPEMIG, bem como ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Rosemar Silva agradece à FAPEMIG via EDITAL 01/2016 - DEMANDA UNIVERSAL - PROCESSO N.: TEC - APQ-01119-16, à FAU pelo Processo de Chamada Pública Nº 02/2018 e ao CNPq, via projeto n. 426018/2018-4, Chamada MCTIC/CNPq Nº 28/2018 - Universal pelo apoio financeiro e que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. Raphael Lima de Paiva agradece o Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí pela liberação de afastamento para continuidade do doutorado.

6. REFERÊNCIAS

- Boothroyd, G., Knight, W. A., “Fundamentals of machining and machine tools”, Third Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006;
- Judong, L., Wei, Y., Songwei, H., Zhilong, X., “Experimental study on grinding-hardening of 1060 steel”, Energy Procedia 16, 2012, 103-108;
- Kalpakjian, S. And Schmid S.R., “Manufacturing processes for engineering materials”, Pearson Education: 5th ed. PE; International Edition, 2009;
- Klocke, F., “Manufacturing processes 2 – grinding, honing, lapping”, Ed. Springer, Berlin, 2009, 433 p.;
- Malkin, S., Guo, C., "Grinding technology, theory and applications of machining with abrasives", Second Edition, Industrial Press, New York, 2008, 372 p.;
- Seidel, M. W., Zösch, A., Härtel, K., “Grinding burn inspection: Tools for supervising and objectifying of the testing process”, Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research, 82(3), 2018, 253-259;
- Stephenson, D. A., Agapiou, J. S., “Metal cutting theory and practice”, Third Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, 2016, 956 p.;
- Zhejun, Y., Zhonghui, H., “Surface integrity of grinding of bearing steel gcr15 with CBN wheels”, Annals of the CIRP Vol. 38/1/1989, 553-556;

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

SURFACE AND SUBSURFACE INTEGRITY ANALYSIS OF SAE 52100 HARDENED STEEL AFTER GRINDING

Raphael Lima de Paiva^{1,2}

Rosemar Batista da Silva²

¹Federal University of Piauí – UFPI, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, s/n - Ininga, Teresina - PI, 64049-550

²Federal University of Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38408-100

raphaellimap@ufpi.edu.br

rosemar.silva@ufu.br

Abstract. Grinding is a machining process usually employed to confer a combination of low dimensional and geometric deviations to workpieces that were previously machined. However, due the high amount of heat that is generated in the process with conventional abrasive wheels and the fact that most part of this heat is conducted to the workpiece, occurrence of thermal damages in machined components is generally reported, a problem that can compromise the workpiece's integrity and lead to disposal of the part and to losses. In this context, this work aims to analyse the surface integrity of the SAE 52100 hardened steel after peripheral surface grinding with conventional white aluminium oxide grinding wheel. Two machining environments were tested: dry and with coolant applied via conventional delivery technique. The radial depth of cut was also varied: 10 μm and 30 μm . The surface integrity of ground components was assessed by roughness (R_a parameter), microhardness beneath machined surface. Also, images of ground surfaces were analysed by optical microscope. The results showed that low values of surface roughness were obtained, irrespective of the conditions of cutting atmosphere and depth of cut employed. However, the presence of coolant was indispensable to minimize thermal damages caused by the grinding process, both in terms of heat affected zone and in the hardness variation beneath machined surface.

Keywords: Grinding. SAE 52100 steel. Coolant. Radial depth of cut. Surface roughness. Microhardness.

RESPONSIBILITY NOTICE

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