

INFLUÊNCIA DO AVANÇO TRANSVERSAL NA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO SAE 52100 APÓS RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL

Raphael Lima de Paiva

Universidade Federal do Piauí, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella – Ininga, Teresina – PI, Brazil, Zip code: 64049-550.
raphaellimap@ufpi.edu.br

Rodrigo de Souza Ruzzi

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
rodruzzi@gmail.com

Otávio de Souza Ruzzi

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
otavio.ruzzi@ufu.br

Rosemar Batista da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
rosemar.silva@ufu.br

Resumo. A fim de se alcançar tolerâncias dimensionais estreitas e acabamento superior (baixos valores de rugosidade), vários componentes utilizados na indústria metal mecânica são submetidos a processos de usinagem por abrasão, como, por exemplo, retificação. O processo de retificação apresenta uma grande variedade de operações, que por sua vez podem ser realizadas utilizando-se diferentes estratégias. Neste contexto, a retificação plana tangencial pode ser realizada em passagens em cheio do rebolo sobre a superfície ou ainda com a utilização de avanço transversal. Embora já se tenha estudos sobre o efeito do avanço transversal no acabamento, pouco tem sido abordado sobre qual a melhor estratégia a ser utilizada para retificação de uma dada peça, bem como o efeito da estratégia em outras variáveis de saída do processo, como danos térmicos. Além disso, dependendo da estratégia, é possível obter ganhos de produtividade. Assim, este trabalho buscou analisar a influência do avanço transversal na qualidade da superfície (rugosidade e aspecto visual) do aço endurecido SAE 52100 após retificação. Com os resultados, pode-se observar que embora o emprego de avanço transversal tenha reduzido os valores de R_a em até 54%, ele também favoreceu a formação de óxidos na superfície (queima visível de retificação).

Palavras-chave: Retificação, Avanço transversal, Rugosidade, Aço SAE 52100, Tempo de usinagem.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que visa conferir aos componentes retificados uma combinação entre ótimo acabamento ($R_a < 1,6 \mu\text{m}$) e tolerâncias dimensionais estreitas (IT06 – IT03) (Machado *et al.*, 2015). Neste processo, a ferramenta de corte empregada é conhecida como rebolo, a qual é composta por inúmeros grãos abrasivos de elevada dureza e dispostos aleatoriamente com geometria não definida, possuindo múltiplas arestas de corte (Malkin e Guo, 2008). Deste modo, a remoção de material é composta pela soma da remoção individual de cavaco da superfície por meio da ação de cada grão abrasivo (Klocke, 2009).

Dentro do processo de retificação, existem vários tipos de operações que variam de acordo com a forma do rebolo e os movimentos relativos entre o rebolo e a peça (Malkin e Guo, 2008). No caso da retificação plana tangencial, ocorre um contato do rebolo de forma tangente à superfície usinada, a qual resultará em uma geometria plana. Por meio desse contato, são definidos dois principais parâmetros de corte: penetração de trabalho (a_e) e profundidade de corte (a_p). A penetração de trabalho é a grandeza física que consiste no quanto o rebolo penetra na peça, medida no plano de trabalho [plano que contém os vetores da velocidade de corte (v_s) e velocidade da peça (v_w)] e em uma direção perpendicular à direção da velocidade da peça. A profundidade de corte refere-se à profundidade axial ou penetração do rebolo na peça medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. Esta grandeza também pode ser definida como largura efetiva de corte (b), ou seja, é a largura do rebolo que está em contato com a peça e permite a remoção de material (Marinescu *et*

al., 2016). Normalmente ela é selecionada em função do rebolo, podendo variar seu valor entre 1/4 a 4/5 do valor da largura do rebolo (Machado *et al.*, 2015).

Neste contexto, considerando uma superfície com uma largura menor que a largura do rebolo, duas diferentes estratégias de retificação plana tangencial podem ser aplicadas: (1) retificação em cheio (sem avanço transversal), em que a peça realiza apenas movimentos longitudinais e a profundidade de corte (a_p) tem valor igual à largura da peça; (2) retificação com avanço transversal, em que a peça realiza movimentos longitudinais com incrementos transversais com certo valor de avanço transversal ao longo do processo. Evidentemente, para superfícies com larguras maiores que a largura do rebolo, a estratégia com avanço transversal deve ser utilizada a fim de retificar toda a superfície.

Em termos de acabamento, Vickerstaff (1973) realizou ensaios de retificação plana do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio (especificação 6A60I8V75) e relatou menores valores de rugosidade para a condição em que se empregou o menor avanço transversal. Em um trabalho recente, Tung, *et al.* (2019) avaliaram a rugosidade (parâmetro R_a) do aço endurecido 9CrSi (56-58 HRC) após retificação sob diferentes condições de corte, incluindo quatro níveis de avanço transversal (6, 8, 10 e 12 mm/passo). Os autores observaram que a rugosidade da peça aumentou com o avanço transversal, que foi, dentre os parâmetros de corte analisados, a variável de entrada que mais exerceu influência no acabamento. Resultados semelhantes foram observados por Hong, *et al.* (2020).

Assim, apesar de ser esperada uma melhora no acabamento ao se empregar uma estratégia de retificação com avanço transversal, muito pouco tem sido estudado sobre os impactos na ocorrência de danos de origem térmica na superfície retificada. Neste contexto, partindo de um aço bastante susceptível a queimas e constantemente submetido ao processo de retificação pela indústria metal mecânica (SAE 52100 endurecido), o presente trabalho buscou analisar a influência do avanço transversal no acabamento (rugosidade R_a) e aspecto visual da superfície das peças após o processo de retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio branco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ensaio de retificação plana tangencial foram realizados na retificadora P-36, da fabricante MELLO, que possui potência nominal de 2,24 kW e rotação do eixo árvore constante de 2400 rpm. O rebolo utilizado nos ensaios foi de óxido de alumínio branco com diâmetro externo de 280 mm, largura de 25,4 mm, granulometria mesh #46 e especificação 38A46K6V, fabricado pela Saint-Gobain abrasivos. O material da peça utilizado nos ensaios de retificação foi o aço endurecido SAE 52100, com dureza de 60 ± 2 HRC, e geometria cilíndrica com diâmetro de 17 ± 1 mm e 19 mm de comprimento. As faces do corpo de prova foram retificadas.

Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte (v_s) de aproximadamente 35 m/s, velocidade da peça (v_w) de 3 m/min e duas penetrações de trabalho (a_e): 10 μ m e 30 μ m. Além da penetração de trabalho, a estratégia de retificação também foi variada a fim de analisar a influência do avanço transversal: a primeira estratégia consistiu na retificação da superfície com passagem em cheio, em que a profundidade de corte (a_p) ou largura efetiva do rebolo (b) foi de acordo com a largura da peça ($0 < a_p < 16$ mm); nesta estratégia foi utilizada uma passagem de centelhamento (spark-out), que é a passagem do rebolo sobre a superfície retificada da peça, sem incremento de penetração de trabalho. A segunda estratégia corresponde à utilização de $a_p = 0,9$ mm, sendo, portanto, necessário a utilização de cerca de 20 incrementos transversais para a completa usinagem da superfície a ser retificada. A primeira e segunda estratégia de retificação são ilustradas na Figura 1 e Figura 2, respectivamente. Todos os ensaios foram realizados sem aplicação de fluido de corte, isto é, a seco, a fim de maximizar o efeito do acúmulo máximo de calor durante o ensaio para melhor comparar as duas estratégias. Além disso, 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 $a_{ed} = 15$ μ m, velocidade de dressagem $v_d = 140$ mm/min, conferindo um grau de recobrimento do rebolo (U_d) igual a 3.

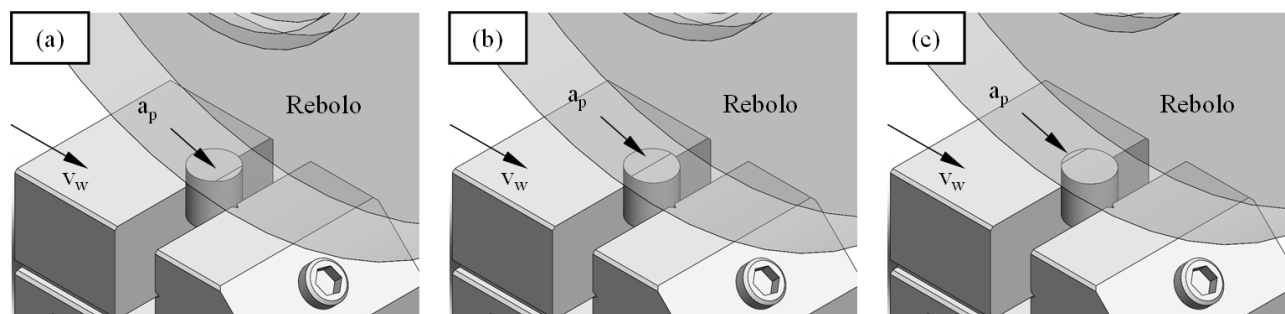


Figura 1: Esquema ilustrativo da estratégia de retificação em cheio ($0 < a_p \leq 16$ mm). (a) Início da passagem do rebolo sobre a peça. (b) Ponto de máxima profundidade de corte ($a_p = 16$ mm). (c) Fim da passagem do rebolo sobre a peça.

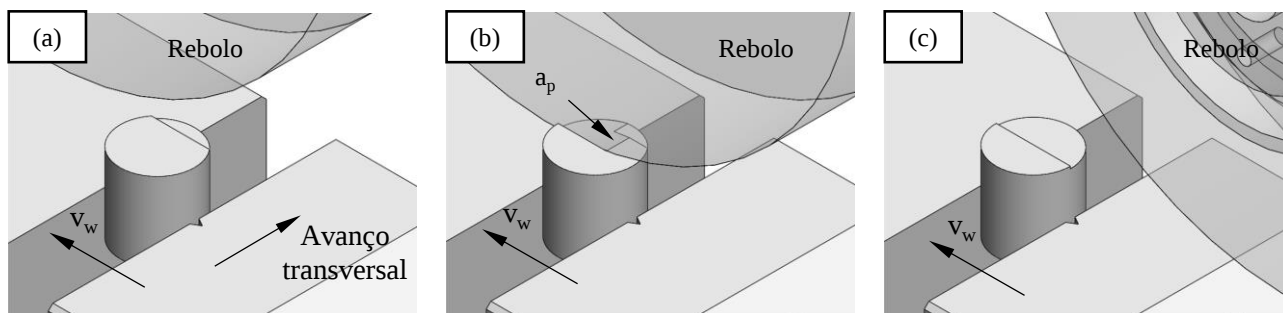


Figura 2: Esquema ilustrativo da estratégia de retificação com avanço transversal ($a_p = 0,9$ mm). (a) Fim de curso do primeiro avanço longitudinal, em que a mesa avança transversalmente para prosseguir com processo. (b) Segunda passagem do rebolo sobre a peça. (c) Fim da segunda passagem do rebolo sobre a peça.

Os parâmetros de saída utilizados neste trabalho para avaliar a influência do avanço transversal foram a rugosidade (parâmetro R_a) e imagens via microscopia óptica da superfície retificada. A rugosidade foi medida com o rugosímetro portátil SJ-201P do fabricante Mitutoyo. Um cut-off de 0,8 mm, filtro Gaussiano e 5 comprimentos de amostragem foram empregados. Cinco medições de rugosidade foram realizadas após cada ensaio de retificação e a média e desvio-padrão foram utilizados para análise. Para a aquisição das imagens via microscopia óptica das superfícies retificadas foi utilizado um estéreo-microscópio Olympus SZ61.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são mostrados os valores médios de rugosidade R_a em função da estratégia de retificação (passagem única ou com avanço transversal) para ambos os valores de penetração de trabalho (a_e) testados neste trabalho. Conforme pode ser observado pela Figura 3, a retificação com passagem única apresentou maiores valores de rugosidade R_a em comparação à retificação com avanço transversal, independentemente da condição de corte utilizada (penetração de trabalho). Para $a_e = 10$ μm , a retificação com avanço transversal resultou em uma redução no parâmetro R_a de 54% em relação à retificação com passagem única. Para $a_e = 30$ μm a redução foi ligeiramente menor: 48%. Além disso, é importante ressaltar que o efeito da penetração de trabalho nos valores de rugosidade da superfície retificada está de acordo com o esperado: maiores valores de penetração de trabalho aumentam a espessura de cavaco não deformado, o que contribui negativamente para o acabamento da superfície retificada (Klocke, 2009; Malkin e Guo, 2008). Resultados semelhantes de aumento nos valores de R_a com a penetração de trabalho também foram observados por Tawakoli, *et al.* (2009) na retificação a seco do aço endurecido SAE 52100 com rebolo de óxido de alumínio.

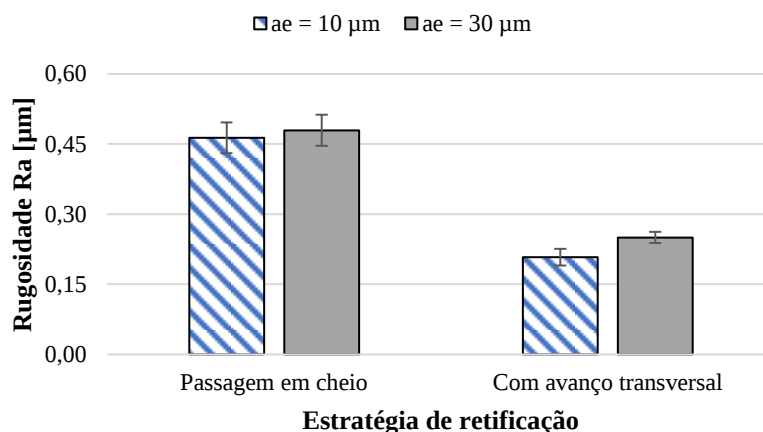


Figura 3: Rugosidade R_a em função da estratégia de retificação, para ambos os valores de a_e testados neste trabalho.

Os melhores resultados em termos de acabamento quando utilizada a retificação com avanço transversal estão associados ao maior tempo de centelhamento que esta estratégia de retificação proporciona. O centelhamento é a passagem do rebolo sobre a superfície retificada sem incremento de penetração de trabalho. Sabe-se do processo de retificação que a penetração de trabalho real é sempre menor que a penetração de trabalho ajustada na máquina-ferramenta, pois o mecanismo de remoção de material apresenta uma parcela significativa de deformações elásticas e plásticas, além do fato de existir uma penetração mínima do grão abrasivo para cisalhamento e consequente remoção do material (Klocke, 2009; Malkin e Guo, 2008; Tian *et al.*, 2015). A recuperação elástica do material exerce influência dada

as pequenas penetrações utilizadas nos processos convencionais de retificação. Neste sentido, é comum que, mesmo sem incremento de penetração de trabalho, uma nova passagem do rebolo sobre a superfície retificada gere contato entre os grãos abrasivos e a peça, removendo assim parte das deformações sofridas pela superfície na passagem anterior.

Para o caso da retificação com avanço transversal conforme utilizado neste trabalho, a primeira passagem do rebolo sobre a peça remove uma porção de material relativa à uma largura de 0,9 mm. Esta superfície retificada na primeira passagem do rebolo é então sucessivamente submetida ao processo de centelhamento pelas posteriores passagens do rebolo sobre a peça, até que, após cerca de 20 incrementos transversais (considerando o avanço transversal de 0,9 mm), toda a superfície da peça seja retificada. Tais sucessivas passagens de centelhamento contribuem para amenizar a altura dos picos formados durante a primeira passagem do rebolo, o que consequentemente melhora o acabamento da superfície retificada (menores valores de R_a), conforme pode ser observado na Figura 3. Essa mesma tendência foi observada por Tung, *et al.* (2019) e Hong, *et al.* (2020). No entanto, é importante salientar que a utilização do avanço transversal acarreta um aumento no tempo total de usinagem da peça (ciclo de retificação), que é diretamente proporcional ao número de incrementos transversais, que por sua vez aumenta com a redução do valor de avanço transversal, isto é, quanto menor for a profundidade de corte (ou largura efetiva do rebolo), maior será o número de passagens do rebolo sobre a peça para retificar toda a área da superfície a ser usinada (Figura 2).

No caso da estratégia com passagem em cheio do rebolo, apenas uma passagem, teoricamente, é o suficiente para remoção de material em toda a área da superfície retificada para uma dada penetração de trabalho, conforme ilustrado na Figura 1. Isto acarreta uma diminuição no tempo de usinagem da peça e, consequentemente, um ganho de produtividade quando utilizada a estratégia de passagem em cheio. No entanto, é importante salientar que este ganho de produtividade não pode comprometer a adequação aos requisitos de projeto, isto é, a tolerância dimensional e os níveis de acabamento necessários para aplicação do componente, bem como a integridade subsuperficial da peça.

Para a estratégia com avanço transversal, vale ressaltar ainda que o acúmulo de calor associado a sucessivas passagens de corte e centelhamento contribui para aumentar a temperatura na zona de contato, o que pode ocasionar danos de origem térmica, como queimas visíveis na superfície retificada. Na Figura 4 são mostradas imagens obtidas via microscopia óptica das superfícies retificadas sob as diferentes condições de retificação utilizadas neste trabalho.

Pode-se observar da Figura 4 que as superfícies retificadas com a utilização de avanço transversal apresentam marcas visíveis de queima, principalmente aquela retificada com a condição mais severa [$a_e = 30 \mu\text{m}$ – Figura 4(d)]. Além disso, observa-se que as marcas de queima apresentam uma largura aproximadamente igual à profundidade de corte utilizada na estratégia de avanço transversal. Tais marcas de queima na superfície retificada é consequência da formação de óxidos durante o processo de retificação (Malkin e Guo, 2008), e devem ser evitadas pois reduzem a vida à fadiga dos componentes (Stephenson e Agapiou, 2016). As superfícies retificadas utilizando a estratégia de passagem em cheio [Figura 4(a) e (b)] não apresentaram queimas visíveis de retificação. No entanto, é importante salientar que a ausência de queimas visíveis não significa ausência de danos térmicos, sendo necessário portanto a análise de outras variáveis de saída como, por exemplo, a microdureza e/ou microestrutura abaixo da superfície retificada (De Paiva e Da Silva, 2019).

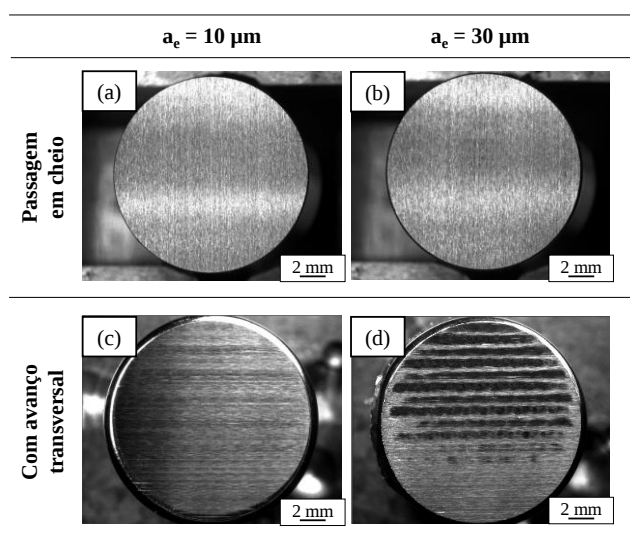


Figura 4: Imagens via microscopia óptica das superfícies retificadas.

Ressalta-se que a profundidade de corte (ou largura efetiva do rebolo) utilizada na retificação com avanço transversal, embora não analisada neste trabalho em diferentes níveis, é um importante parâmetro de controle do processo. De acordo com Malkin e Guo (2008), profundidades de corte muito pequenas podem causar quebras nas quinas do rebolo, tornando sua topografia não uniforme, o que pode acarretar erros dimensionais na superfície usinada. Além disso, uma largura efetiva do rebolo muito pequena também pode acelerar o desgaste dos grãos abrasivos na quina do rebolo, fazendo com

que estes percam sua capacidade de corte, aumentando a área de contato entre os grãos abrasivos e a superfície, o que contribui para aumentar a geração de calor durante o processo.

Por fim, na Tabela 1 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada uma das estratégias de retificação avaliadas, considerando as condições de retificação utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens das estratégias de retificação com passagem em cheio do rebolo e com avanço transversal.

Estratégia de retificação	Vantagens	Desvantagens
Passagem em cheio do rebolo	– Menor tempo de usinagem; – Menor possibilidade de ocorrência de queima visível na superfície retificada.	– Acabamento inferior da superfície retificada (maior valor de rugosidade Ra); – A profundidade de corte não pode ser ajustada, sendo igual à largura da peça.
Com avanço transversal	– Acabamento superior da superfície retificada (menor valor de rugosidade Ra); – Possibilidade de ajuste da profundidade de corte (largura efetiva do rebolo).	– Maior tempo de usinagem; – Maior possibilidade de ocorrência de queima visível na superfície retificada; – Desgaste acentuado na quina do rebolo.

4. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos após a realização de ensaios de retificação plana tangencial com estratégia de passagem em cheio e com avanço transversal para as condições de retificação utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- Comparado com a retificação com passagem em cheio do rebolo sobre a peça, a utilização de avanço transversal contribuiu para reduzir em 54% e 48% os valores de rugosidade Ra da superfície retificada com penetração de trabalho (a_e) de 10 μm e 30 μm , respectivamente.
- Embora tenha apresentado menores valores de rugosidade em comparação a superfícies retificadas com a estratégia de passagem em cheio do rebolo, a utilização de avanço transversal resultou em marcas de queima visível na superfície retificada, principalmente quando utilizada a condição de corte mais severa ($a_e = 30 \mu\text{m}$).
- A escolha da estratégia de retificação entre passagem em cheio do rebolo sobre a peça e com avanço transversal deve levar em consideração o tempo total de usinagem da peça (ou ciclo de retificação), que é diretamente proporcional ao número de incrementos transversais necessários para usinagem de toda a superfície, que aumenta com a redução do avanço transversal (menores valores de profundidade de corte). Além disso, quando se opta por menores valores de profundidade de corte, pode-se acarretar danos de origem térmica como a presença de queima visível na superfície retificada.

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. Os autores também agradecem à Saint-Gobain Abrasivos pela doação do rebolo utilizado neste trabalho. Alguns autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), via Edital 01/2016 – Demanda Universal – Processo N°: TEC-APQ-01119-16, e ao CNPq – Processos N° 426018/2018-4 (Edital Universal) e N° 310264/2019-7 (Bolsa de Produtividade em Pesquisa) pelo apoio financeiro que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- De Paiva, R.L., Da Silva, R.B., 2019. ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIE DO AÇO ENDURECIDO SAE 52100 APÓS RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL, in: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. ABCM, p. 3–8. <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2019.COF2019-0361>
- Hong, T.T., Cuong, N. Van, Ky, L.H., Tung, L.A., Tu, N.T., Pi, V.N., 2020. Effect of process parameters on surface roughness in surface grinding of 90crsi tool steel. Solid State Phenom. 305 SSP, 191–197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.305.191>

- Klocke, F., 2009. *Manufacturing Processes 2*, RWTHedition. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., da Silva, M.B., 2015. *Teoria da usinagem dos materiais*, 3º ed. Blücher, São Paulo.
- Malkin, S., Guo, C., 2008. *Grinding Technology - Theory and Applications of Machining With Abrasives*, Second. ed. Industrial Press, New York.
- Marinescu, I., Hitchiner, M., Uhlmann, E., 2016. *Handbook of machining with grinding wheels*, Second Edi. ed, Vasa. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Stephenson, D.A., Agapiou, J.S., 2016. *Metal Cutting Theory and Practice*, Third Edit. ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., Stöckert, S., Rasifard, A., 2009. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 49, 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.015>
- Tian, L., Fu, Y., Xu, J., Li, H., Ding, W., 2015. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 89, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.010>
- Tung, L.A., Pi, V.N., Ha, D.T.T., Hung, L.X., Banh, T.L., 2019. A Study on Optimization of Surface Roughness in Surface Grinding 9CrSi Tool Steel by Using Taguchi Method, in: *Advances in Engineering Research*. p. 100–108. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_15
- Vickerstaff, T.J., 1973. Wheel Wear a N D Surface Roughness in Cross Feed Surface G R I N D I N G 13, 183–198.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

CROSS-FEED INFLUENCE ON SAE 52100 SURFACE QUALITY AFTER PERIPHERAL SURFACE GRINDING

Raphael Lima de Paiva

Federal University of Piauí, School of Mechanical Engineering, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella – Ininga, Teresina – PI, Brazil, Zip code: 64049-550.
raphaellimap@ufpi.edu.br

Rodrigo de Souza Ruzzi

Federal University of Uberlândia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
rodruzzi@gmail.com

Otávio de Souza Ruzzi

Federal University of Uberlândia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
otavio.ruzzi@ufu.br

Rosemar Batista da Silva

Federal University of Uberlândia, Faculty of Mechanical Engineering, Campus Santa Mônica – Uberlândia - MG, Zip code 38408-100.
rosemar.silva@ufu.br

Abstract. *In order to achieve tight dimensional tolerances and superior surface finish (low values of surface roughness), many components used in the metalworking industry are subjected to abrasive machining processes, such as grinding. The grinding process presents a wide range of operations, which in turn can be carried out using different strategies. In this context, the peripheral surface grinding can be performed in full passages of the grinding wheel on the surface or using cross-feed strategy. Although studies have already been carried out on the effect of the cross-feed on surface finish, little has been discussed about the best strategy to be used for grinding a given component, as well as the effect of the strategy on other output parameters, such thermal damages. Furthermore, depending on the selected strategy, it is possible to increase productivity. Thus, this work sought to analyze the influence of the cross-feed on surface roughness (R_a parameter) and visual aspect of the SAE 52100 hardened steel surface after grinding. The results showed that although the use of cross-feed has reduced R_a values by up to 54%, it has also favored the formation of oxides on the surface (visible grinding burn).*

Keywords: Grinding, Cross-feed, Surface roughness, SAE 52100 steel, Machining time.

RESPONSIBILITY NOTICE

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