

CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE PARA AVALIAR FENÔMENOS DE RETIFICAÇÃO EM INCONEL 718

Rodrigo de Souza Ruzzi

Rosemar Batista da Silva

Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, Brasil.
e-mails: rodrigo.ruzzi@ufu.br; rosemar.silva@ufu.br

Amauri Hassui

Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Rua Mendeleiev 200, CEP: 13083-970, Campinas, SP, Brasil
e-mail: ahassui@fem.unicamp.br

Álison Rocha Machado

Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR, Curitiba, PR, CEP: 80215-901, Brasil.
Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, Brasil.
e-mail: alisson.rocha@pucpr.br

Resumo. Por atingir uma combinação de baixa rugosidade e alta exatidão dimensional, a retificação é dentre os processos de usinagem convencionais a primeira opção para acabamento. Porém, é um processo que envolve uma alta geração de calor, e assim as condições de usinagem devem ser selecionadas adequadamente, já que qualquer erro nesta etapa pode comprometer as anteriores. Um dos principais parâmetros de retificação é a espessura equivalente de corte (h_{eq}), que representa uma medida relativa da severidade da retificação que se correlaciona com as forças de retificação, energia, desgaste do rebolo e rugosidade. Contudo, este parâmetro não leva em consideração certas peculiaridades de alguns materiais, por exemplo o Inconel 718, que ocupa uma posição de destaque por ser muito utilizado na indústria aeronáutica, mas que possui baixa usinabilidade. Assim, o presente trabalho avaliou a rugosidade (R_a e R_z), as forças de retificação, o coeficiente de atrito e a energia específica de peças de Inconel 718 retificadas com o mesmo h_{eq} a fim de verificar a correlação entre estes parâmetros e o h_{eq} . Diferente do esperado, foram encontrados resultados distintos para um mesmo h_{eq} , os quais podem ser atribuídos às particularidades do material. Em geral, os melhores resultados foram obtidos na condição com a menor taxa de remoção de material.

Palavras chave: Retificação. Inconel 718. Espessura Equivalente de Corte. Velocidade de corte. Retificabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação apresenta peculiaridades em relação aos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, sendo utilizado quando é requerida a combinação entre baixa rugosidade e alta exatidão dimensional das peças usinadas, ou ainda uma opção para a usinagem de materiais de elevada dureza e em componentes de alta tecnologia devido ao controle de tensões residuais e variação microestrutural (Jackson and Davim, 2011; Marinescu et al., 2007). A retificação pertence à classe dos processos de usinagem por abrasão e utiliza um rebolo abrasivo que rotaciona a altas velocidades de corte (v_s), para remover material da peça (Marinescu et al., 2007).

Algumas peculiaridades do processo de retificação tais como o ângulo de saída dos grãos abrasivos do rebolo serem predominantemente negativo durante o corte, elevadas velocidades de corte, baixas penetrações de trabalho, e o fato de os rebolos convencionais serem pobres condutores de calor, durante o processo de retificação ocorre uma elevada geração de calor e com isso um aumento de temperatura na região de corte. E o grande agravante no caso da retificação é o calor que vai para a peça. E dependendo do gradiente de temperatura, a peça estará sujeita a danos térmicos tais como queima de retifica, alterações estruturais em sua superfície ou abaixo desta, tensões de tração ou ainda trincas, comprometendo assim a funcionalidade da mesma. (Marinescu et al., 2007).

Com isso, a seleção correta das condições de corte no processo de retificação exige mais atenção dos usuários de usinagem. Dentre os principais parâmetros de entrada a serem definidos, está a taxa de remoção de material (Q_w) é o volume de material removido por unidade de tempo e pode ser determinada conforme a eq. (1) (Malkin e Guo, 2008).

$$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w \quad (1)$$

Em que Q_w é a taxa de remoção de material (mm^3/min), a_e é a penetração de trabalho (mm), a_p é a profundidade de corte, no caso, a largura de contato (mm) e v_w é a velocidade da peça (mm/min). A largura de contato (a_p) é a largura do rebolo que está efetivamente removendo material, assim, é menor ou igual a largura do rebolo (Klocke, 2009). Dividindo-se a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de contato (a_p), obtém-se a taxa de remoção de material específica (Q'_w), conforme indicado na eq. (2) (Malkin e Guo, 2008).

$$Q'_w = \frac{Q_w}{a_p} = a_e \cdot v_w \quad (2)$$

Assim, Q'_w é a taxa volumétrica de remoção de material por unidade de largura ativa do rebolo (mm^2/min), sendo usada para comparar diferentes processos de retificação (Cameron et al., 2010).

Para quantificar uma condição de trabalho, o parâmetro mais utilizado em processo de retificação é a espessura equivalente de corte (h_{eq}), que corresponde à espessura da camada contínua de material (cavaco) sendo removida (Malkin e Guo, 2008). Tal parâmetro pode ser definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e a velocidade de corte v_s (Heinzel e Bleil, 2007). O valor da espessura equivalente de corte é sempre menor que a unidade. Assim, de acordo com Marinescu et al. (2007), o h_{eq} pode ser representado pela eq. (3).

$$h_{eq} = \frac{a_e \cdot v_w}{v_s \cdot 60} = \frac{Q'_w}{v_s \cdot 60} \quad (3)$$

Em que h_{eq} é a espessura equivalente de corte (μm) e v_s é a velocidade de corte (m/s).

De acordo com Malkin e Guo (2008), a espessura equivalente de corte é uma medida que representa uma medida relativa da severidade da retificação e que se correlaciona razoavelmente bem não apenas às forças de retificação e energia, mas também a outras características de desempenho, incluindo o desgaste do rebolo e rugosidade da superfície retificada.

E quanto ao material da peça, é outro fator muito importante a ser considerado no processo de retificação. Embora a maioria dos metais retificados sejam os aços, a retificação de materiais não ferrosos tem sido cada vez mais comum. As superligas de níquel são consideradas materiais de difícil usinabilidade e que vem ganhando cada vez mais aplicações, dentre elas o Inconel 718 merece uma posição de destaque. E as principais causadas da difícil usinabilidade em termos de retificação de tal liga referem-se a elevada afinidade química com os materiais cerâmicos e baixa condutividade térmica em relação aos aços. Alguns autores também afirmam que o fato de ele ser capaz de manter sua dureza mesmo em altas temperaturas e da sua alta tendência ao encruamento (Mandal et al., 2014; Zeng et al., 2015),

Assim, o presente trabalho avaliou a rugosidade (parâmetros R_a e R_z), as forças de retificação (tangencial e normal), o coeficiente de atrito e a energia específica de peças de Inconel 718 retificadas com o mesmo h_{eq} a fim de verificar a correlação entre estes parâmetros e o h_{eq} . Para isso foram empregadas duas diferentes combinações dos parâmetros a_e e v_s que resultam no mesmo valor de h_{eq} . Ao longo dos testes, todos os demais parâmetros de entrada foram mantidos constantes: a velocidade da peça (v_w), o rebolo utilizado e as condições de dressagem e lubri-refrigeração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de usinagem foram realizados em uma retificadora plana tangencial da marca Mello, modelo P36, com potência igual a 2,24 KW. Utilizou-se um m rebolo de carbetto de silício verde com as seguintes dimensões: 254 mm de diâmetro externo X 76 mm de diâmetro interno X 25,4 mm de espessura. As peças de Inconel 718 (42 HRc) foram preparadas e resultaram nas dimensões de 40 mm de comprimento X 7 mm de largura X 17 mm de altura, para que os ensaios de retificação fossem realizados na superfície de 40 mm X 7 mm. Um dressador do tipo fliese foi utilizado para a dressagem do rebolo a cada teste. As condições de corte empregadas neste trabalho estão resumidas na Tab. 1.

Tabela 1. Condições de retificação

Tipo de retificação	Plana tangencial
Rebolo	39C 80 KVK
Velocidade de corte (v_s) [m/s]	30 e 10
Velocidade da peça (v_w) [mm/min]	7500
Penetração de trabalho [μm]	10 e 30
Material da peça	Inconel 718
Dressador	Fliese ($b_d = 0,63 \text{ mm}$)
Profundidade de dressagem [mm]	0,020
Grau de recobrimento (U_d)	4

Para a análise da mesma espessura equivalente de corte foram utilizadas as combinações que resultaram em duas diferentes condições mostradas na Tab. 2.

Tabela 2. Combinações de parâmetros utilizadas para determinação de h_{eq}

Condição	v_s (m/s)	v_w (mm/min)	a_e (mm)	Q'_w (mm ² /min)	h_{eq} (μm)
1	30	7500	0,030	225,0	0,125
2	10	7500	0,010	75,0	0,125

Para cada uma das condições selecionadas na Tab. 2 foram realizadas réplicas a fim de garantir a repetibilidade dos ensaios, e todos os resultados das variáveis de saída analisados contam com a média e o desvio padrão das medições realizadas (teste e réplica).

Durante os testes de retificação foi utilizada a técnica convencional de aplicação de fluido de corte (abundância) aplicada através de um bocal construído com a geometria baseada no modelo proposto por Webster et al. (1995). Foi utilizado o fluido corte semissintético de base vegetal Vasco 7000, da fabricante Blaser Swisslube, o qual foi aplicado com uma vazão de 11 L/min na zona de corte.

Como parâmetros de saída, foram analisadas a rugosidade (parâmetros R_a e R_z), as componentes da força, normal (F_n) e tangencial (F_t). A rugosidade foi medida utilizando um perfilmetro do fabricante Taylor Hobson, modelo Talysurf Intra, com um filtro cut-off de 0,8 mm. As forças foram medidas com o auxílio de um dinamômetro da marca Kistler, Type 5070. Com os valores das forças (tangencial e normal) foi possível calcular outra variável de saída, o coeficiente de atrito, ou relação de forças (μ), uma das mais importantes variáveis de saída do processo de usinagem e, de acordo com (Malkin e Guo, 2008), pode ser calculado conforme mostra a eq. (4).

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (4)$$

E, por fim o último parâmetro de saída analisado, de acordo com Malkin e Guo (2008) um parâmetro fundamental, usado para avaliar a eficiência do processo, é a energia específica (U), que pode ser definida com a energia gasta por unidade de material removida. A importância deste parâmetro reside no fato de que qualquer mecanismo de interação abrasivo-peça proposto deve satisfazer um balanço de energia que possa explicar a magnitude da energia específica e sua dependência das condições de processamento. A energia específica da retificação é obtida pelo quociente da potência de corte (P) pela taxa de remoção de material (Q_w), conforme mostra a eq. (5).

$$U = \frac{P}{Q_w} \quad (5)$$

A potência de corte (P) por sua vez pode ser obtida pelo produto da velocidade de corte (v_s) e da componente tangencial da força (F_t), assim, substituindo-se a potência de corte e a taxa de remoção de material de acordo com a eq. (1) na eq. (5), tem-se energia específica, U , pode ser calculada pela eq. (6):

$$U = \frac{v_s \cdot F_t}{a_e \cdot v_w \cdot b} \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 são apresentados os valores de rugosidade média (R_a) e da altura máxima do perfil de rugosidade (R_z) obtidos após a retificação sob as duas condições de corte apresentadas na Tab. 2, com o mesmo valor de espessura equivalente de corte (h_{eq}). Pode-se observar que tanto os valores de R_a como os valores de R_z apresentaram diferenças significativas entre as condições testadas, sendo que a condição 2 (Tab. 2) apresentou os melhores resultados para ambos parâmetros de rugosidade.

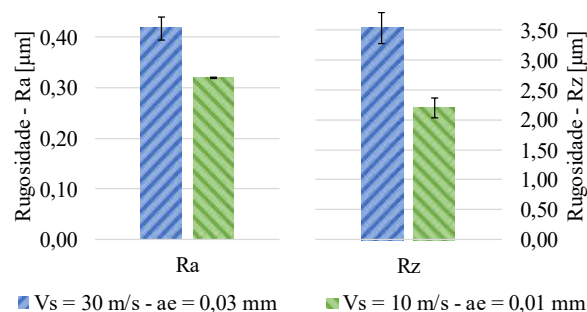


Figura 1. Rugosidades (parâmetros R_a e R_z) das amostras de Inconel 718 em função da combinação de condições de corte da Tab. 2

Assim, de acordo com a Fig. 1 pode ser observado que, embora ambas condições 1 e 2 apresentem a mesma espessura equivalente de corte (h_{eq}) os valores rugosidade obtidos foram diferentes. De acordo com a teoria de usinagem por abrasão, esperava-se encontrar resultados similares. Mas é importante salientar que a teoria que aborda o tópico sobre espessura equivalente de corte não especifica o material que está sendo retificado (Malkin e Guo, 2008), e como a superliga utilizada apresenta características peculiares em relação aos aços, por exemplo, a elevada taxa de encruamento, baixa condutividade térmica, o resultado contraditório encontrado na Fig. 1 pode ser atribuído ao material usinado. Na figura 2a pode-se observar que as forças de retificação na condição 2 foram muito menores, o que atenua as vibrações e favorece uma melhor rugosidade.

Da Figura 2 podem ser observados os resultados das forças de retificação (Fig. 2a), do coeficiente de atrito (Fig. 2b) e da energia específica de corte (Fig. 2c) para as duas condições analisadas. Da figura 2a pode-se observar que as forças de retificação na condição 2 foram muito menores, o que atenua as vibrações e favorece um melhor acabamento ou menor valor de rugosidade.

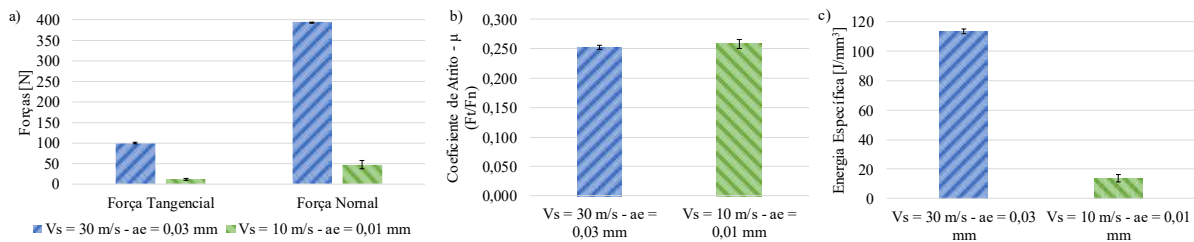


Figura 2. Forças de retificação (a), Coeficiente de atrito (b) e energia específica de corte (c) após a retificação plana de Inconel 718 com rebolo de SiC em diferentes condições de corte.

Como pode ser observado na Fig. 2a, embora o h_{eq} tenha sido o mesmo para as duas condições, a usinagem com a condição 1 resultou em forças de corte muito maiores, tanto para a componente tangencial quanto para a normal, o que não era esperado de acordo com o que é normalmente relatado na literatura (Malkin e Guo, 2008). Como o material usinado se trata de uma superliga com características específicas, uma possível explicação para este resultado está nas propriedades deste material, dentre elas a capacidade de manter sua dureza mesmo quando em operação em elevadas temperaturas, assim, o que dificulta o corte e, por conseguinte exige maiores as forças de corte. Além disso, o fato de que uma temperatura maior (abaixo da temperatura de recristalização) favorece ainda mais a ocorrência do encruamento, o que pode ter ocorrido com o uso de $v_s = 30 \text{ m/s}$ e $a_e = 0,03 \text{ mm}$.

Como a condição de lubri-refrigeração utilizada para as duas condições (Tab. 2) foi a mesma, portanto, conforme já era esperado o coeficiente de atrito não apresentou uma variação significativa, conforme pode ser visto na Fig. 2b.

Como a variação da velocidade de corte v_s e da penetração de trabalho a_e ocorreu na mesma proporção (3x), de acordo com a Eq. (6), a energia específica assumiu um relação diretamente proporcional à força tangencial, assim, como na condição 2 a força tangencial foi muito menor, a energia específica nesta mesma condição também foi muito menor (Fig. 2c).

4. CONCLUSÕES

Após a realização dos testes de retificação do Inconel 718 com o mesmo valor de h_{eq} , as seguintes conclusões puderam ser tiradas:

- Os valores de rugosidade, parâmetros R_a e R_z , obtidos para as superfícies retificadas com a menor taxa de remoção de material foram melhores;
- As forças de corte foram maiores na condição com maior velocidade de corte e penetração de trabalho devido às características do material;
- O coeficiente de atrito não sofreu alterações com a variação dos parâmetros, enquanto a energia específica apresentou o mesmo comportamento da força tangencial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Rodrigo de Souza Ruzzi agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado (processo n. 141472/2017-0). Rosemar Silva agradece ao CNPq, via processos n. 426018/2018-4 Chamada MCTIC/CNPq N° 28/2018 - Universal – e n. 311337/2016-3- Chamada CNPq N° 12/2016 - Bolsas de Produtividade em Pesquisa – PQ, pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Cameron, A., Bauer, R.J., Warkentin, A., 2010. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008>
- Heinzel, C., Bleil, N., 2007. The use of the size effect in grinding for work-hardening. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 56, 327–330. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.075>
- Jackson, M.J., Davim, J.P., 2011. *Machining with Abrasives*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7302-3>
- Klocke, F., 2009. *Manufacturing Processes 2*, RWTHedition. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>
- Malkin, S., Guo, C., 2008. *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, Second Edition. Industrial Press, New York, NY.
- Mandal, B., Sarkar, A., Biswas, D., Das, S., 2014. an Effective Grinding Fluid Delivery Technique To Improve Grindability of Inconel-600, in: 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014). pp. 1–6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2874.5768>
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W.B., Inasaki, I., 2007. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press.
- Webster, J.A., Cui, C., Mindek, R.B., Lindsay, R., 1995. Grinding Fluid Application System Design. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 44, 333–338. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62337-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62337-3)
- Zeng, Q., Liu, G., Liu, L., Qin, Y., 2015. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 229, 238–250. <https://doi.org/10.1177/0954405414526384>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF DIFFERENT GRINDING CONDITIONS OF THE INCONEL 718 WITH SAME EQUIVALENT CHIP THICKNESS

Rodrigo de Souza Ruzzi

Rosemar Batista da Silva

Federal University of Uberlandia (UFU), School of Mechanical Engineering, Uberlandia, Brazil
e-mails: rodrigo.ruzzi@ufu.br; rosemar.silva@ufu.br

Amauri Hassui

Campinas State University (UNICAMP), Faculty of Mechanical Engineering, Campinas, SP, Brazil
e-mail: ahassui@fem.unicamp.br

Álison Rocha Machado

Mechanical Engineering Graduate Program, PUCPR, Curitiba/PR, CEP: 80215-901, Brazil
Federal University of Uberlandia (UFU), School of Mechanical, Uberlandia, Brazil
e-mail: alisson.rocha@pucpr.br

Abstract. Due to the capacity to achieve a combination of low roughness and high dimensional accuracy, grinding is the first choice among the conventional machining processes. However, it is a process that involves a high heat generation and thus the machining conditions must be properly selected, since any error in this stage can compromise previous ones. One of the major grinding parameters is the equivalent chip thickness (heq), which represents a relative measurement of the grinding severity that correlates with the grinding forces, energy, wheel wear and surface roughness. Although this parameter does take into consideration certain peculiarities of some materials, for instance the Inconel 718 that occupies a prominent position aeronautical industry, but that presents low machinability. Thus, the present work evaluated the surface roughness (Ra and Rz), the grinding forces, the coefficient of friction and the specific energy of Inconel 718 workpieces after grinding with the same heq in order to verify the correlation between these parameters and the heq . Contrary to expected, different results were found for after machining with the same heq what can be attributed to the particularities of the material. In general, the best results were obtained after machining with the lowest material removal rate.

Keywords: Grinding. Inconel 718. Equivalent Chip Thickness. Cutting speed. Grindability.

RESPONSIBILITY NOTICE

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