

INFLUÊNCIA DOS REBOLOS DE ALUMINA E PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A POTÊNCIA E A ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA RETIFICAÇÃO DE MERGULHO DO AÇO DIN 18CrNi8

Raynier Estrada Garrido

Milton Luiz Polli

Luciano De Oliveira Arantes

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000.

ing_raynierestrada@gmail.com, polli@utfpr.edu.br, lucianoarantes@hotmail.com

Resumo. A retificação constitui um processo de especial importância na usinagem de peças mecânicas que requerem exigentes tolerâncias para aplicações de precisão. Durante a retificação a maior parte da energia consumida é convertida em calor, razão pela qual é necessário analisar valores como a potência, a força tangencial e a energia específica de corte, parâmetros que devido a sua relação sobre o calor gerado são de importância para controlar as modificações nas propriedades mecânicas das superfícies usinadas. Para aumentar a eficiência e produtividade da indústria foram desenvolvidos novos abrasivos como a alumina microcristalina, a qual permite diminuir as forças de corte e o consumo de energia. Esta pesquisa compara o desempenho de rebolos de alumina microcristalina e monocristalina para a retificação cilíndrica de mergulho do aço 18CrNi8, estudando a influência sobre a potência, força tangencial e energia específica de corte, da velocidade de avanço, velocidade de rotação da peça e tipo de rebolo. Além disso, foram estudadas as dimensões finais das peças com a finalidade de atingir as tolerâncias requeridas. Através da comparação entre os desempenhos de dois rebolos de corte foi possível identificar que o uso de abrasivos de alumina microcristalina tem uma tendência de diminuição na potência, na força tangencial e na energia específica de corte. Além disso, observou-se como o aumento da velocidade de avanço propicia um aumento na potência e na força tangencial de corte e uma tendência a diminuir a energia específica de corte.

Palavras chave: Retificação cilíndrica externa de mergulho. Potência de corte. Energia específica de corte. Alumina microcristalina. Parâmetros de corte.

1. INTRODUÇÃO

A retificação constitui um processo de corte de grande importância na obtenção de exigentes tolerâncias dimensionais e de forma. Adicionalmente, por ser o último processo de remoção de material, uma adequada escolha do rebolo e parâmetros de corte é indispensável para garantir uma adequada qualidade da peça em termos dimensionais e com um consumo energético e temperaturas que não afetem as propriedades da peça.

Com o alvo de melhorar a qualidade das peças e a produtividade da indústria são continuamente desenvolvidos novos abrasivos com melhores desempenhos, um desses abrasivos são aqueles feitos de alumina microcristalina (sol-gel ou seed-gel). Os rebolos de alumina microcristalina estão formados por grãos com tamanho entre 0,1 e 5 μm , tendo na maioria dos casos um tamanho menor a 1 μm . Esta característica propicia a autoafiação dos rebolos durante o corte e aumenta a resistência ao impacto dos rebolos de alumina microcristalina em relação as contrapartes de alumina monocristalina (NALDONY, 2014; KLOCKE, 2009).

Adicionalmente, o custo deste tipo de rebolo é geralmente entre 2 a 3 vezes o custo de seu equivalente de óxido de alumínio monocristalino. E em relação aos abrasivos de CBN, o óxido de alumínio microcristalino podem ser 30 vezes mais econômicos, são mais fáceis de dresser e não necessitam de máquinas com rigidez tão elevada como nos casos de usinagem com superabrasivos (STARKOV et al., 2014; JACKSON; MILLS, 2000). Assim, os rebolos de alumina microcristalina se converteram em uma opção importante para retificações com solicitações intermediárias entre os rebolos convencionais e os superabrasivos.

Os trabalhos de Mayer et al. (2006) e Klocke et al. (2009) apresentam detalhadamente os processos de retificação e desgaste de grãos de alumina com estrutura microcristalina. Eles observaram como a melhora na capacidade de corte desses grãos está intimamente ligada às propriedades tribológicas das lamelas deformadas plasticamente nos grãos produto do desgaste, observando-se uma diferença significativa do coeficiente de atrito, o qual para a usinagem de aço endurecido é de 0,19 e 0,34 para rebolos de alumina microcristalina e alumina branca fundida respectivamente (NALDONY, 2014).

Existe uma importante relação entre as temperaturas durante o corte e a qualidade da peça, mesmo que durante a retificação seja removido um volume de material pequeno a energia requerida para o corte é significativamente maior em comparação com processos de corte com ferramentas de geometria definida, já que quase toda a energia consumida é convertida em calor (MALKIN, 2008). Este calor entra na peça e pode comprometer a integridade superficial da peça

podendo ocasionar retêmpera, endurecimento superficial e amolecimento subsuperficial, tensões residuais trativas e queima.

Quando as temperaturas atingem ao valor de transformação limite, determinada pela temperatura de austenitização do aço e pelas deformações plásticas do processo, forma-se austenita e com o resfriamento aparece uma lamela de martensita não revenida, processo conhecido como retêmpera, o qual fragiliza a superfície da peça (MALKIN, 2008). Se a temperatura não atinge a temperatura de transformação o material libera tensões do encruamento e de tratamentos térmicos prévios acontecendo o amolecimento da superfície acontecendo um processo de queima. Frequentemente acontece uma combinação dos processos anteriores por causa da distribuição de temperaturas em função à profundidade desde a superfície, produzindo-se um endurecimento da superfície e um amolecimento subsuperficial (LIU et al., 2015; ROWE, 2014).

A medição da temperatura no ponto de corte por métodos diretos apresenta dificuldades técnicas, devido à pequenas áreas de contato, as altas velocidades e à rapidez de alguns processos de dano térmico, como no caso da retêmpera (LIU et al., 2015; ROWE, 2014). Por estas razões são estudados parâmetros energéticos e dinâmicos que permitem estudar a possibilidade de dano térmico, entre estes parâmetros está a potência, a força tangencial e a energia específica de corte.

Durante os processos de retificação são produzidas forças de corte entre a peça e o rebolo com componentes tangencial e normal. A componente tangencial (f_t) se relaciona diretamente com a potência de corte (P_c) e com a velocidade periférica de corte (v_s) através da Eq. 1

$$P_c = f_t \cdot v_s \quad (1)$$

Segundo vários modelos a energia consumida na retificação é convertida em quase em sua totalidade em calor. A energia específica de retificação (u) é distribuída nas componentes de energia de formação de cavaco (u_{ch}), energia de deformação plástica (u_{pl}) e energia de deslizamento (u_{sl}) (MALKIN, 2008; BEN FATHALLAH, 2009; CHOI; SUBRAHMANYA, 2008).

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_{sl} \quad (2)$$

A energia de formação do cavaco está relacionada com o mecanismo de formação deste por cisalhamento. Contrariamente ao torneamento e a fresagem, na retificação é gerado cavaco com maiores variações devido às formas e profundidades das partículas abrasivas dentro do rebolo. A componente de energia por deslizamento se refere às perdas energéticas pelo atrito entre gumes desgastado das partículas abrasivas e a superfície da peça. E a componente por deformação plástica se refere à energia consumida pelo processo de deformação da superfície sem remoção de material (ROWE, 2014; MALKIN, 2008). Estudos anteriores mostram como, para uma retificação cilíndrica de mergulho, a energia de deformação plástica diminui com o aumento da taxa de remoção de material (MALKIN, 2008).

Esta pesquisa compara o desempenho de rebolos de alumina microcristalina e monocristalina para a retificação cilíndrica de mergulho do aço 18CrNi8, estudando a influência sobre a potência, força tangencial e energia específica de corte, da velocidade de avanço, velocidade de rotação da peça e tipo de rebolo. Além disso, foram estudadas as dimensões finais das peças com a finalidade de atingir as tolerâncias requeridas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A peça a ser estudada é o bico injetor de um motor a Diesel. Ela é previamente usinada através de processos de corte com ferramentas de geometria definida deixando um sobremetal de 230,5 mm³. Para a fabricação desta peça são realizados vários processos de retificação (retificação interna e plana), nesta pesquisa se estudou especificamente a retificação cilíndrica externa de perfil por mergulho oblíquo de 25° com a horizontal, conforme a Fig. 1. Da mesma forma, serão controladas as dimensões do diâmetro da haste e a profundidade do assento, na Fig. 1, pois estas regiões representam uma função importante no funcionamento da peça final.

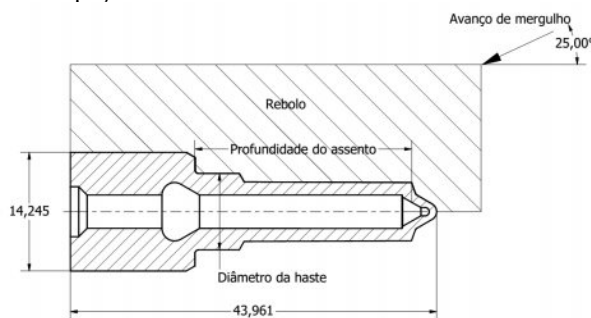


Figura 1 Peça, rebolo e dimensões (Autor).

As peças são feitas de aço DIN 18CrNi8, com a mostrada na Tab. 1.

Tabela 1 Composição química do aço DIN 18CrNi8

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Composição Mássica (%)	0,13 a 0,22	0,2 (Máximo)	0,36 a 0,64	0,03 (Máximo)	0,04 (Máximo)	1,74 a 2,16	1,75 a 2,15

A usinagem foi realizada em uma retífica cilíndrica externa marca ZEMA, Numerika GL-600-HP com controle FANUC 0i-TD. Esta máquina é utilizada para a fabricação do bico injetor da Fig. 1e a configuração da peça é mostrada na Fig. 2.

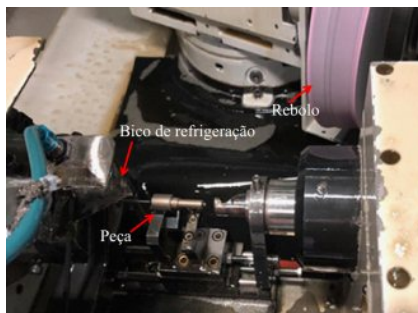


Figura 2 Configuração da peça dentro da máquina (Autor).

Com a finalidade de comparar o desempenho dos rebolos de alumina foram testados dois tipos de abrasivos, o primeiro de alumina monocristalina e o segundo de alumina microcristalina, cujas características se encontram listadas na Tab. 2:

Tabela 2 Característica dos rebolos (Autor)

Rebolo	AA 80.3 K8 V11	3NQP 120 J6 VS3
Abrasivo	Alumina branca fundida	Mistura de: 30% de alumina microcristalina 70% alumina fundida rosa 25A
Tamanho da partícula norma FEPA	F80 (194 µm)	F120 (115 µm)
Grau	K (mole)	J (mole)
Estrutura	8 (média)	6 (média)
Liga	Vitrificada	Vitrificada de nova geração

Para a dressagem foi utilizado um dressador rotativo marca Dr. Kaiser modelo 47 048 37 010, com os seguintes parâmetros.

Tabela 3 Parâmetros de dressagem (Adaptado da empresa)

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade periférica do rebolo	45	m/s
Nº de peças por dressagem	25	Peças
Incremento de dressagem em X	0,050	mm
Incremento de dressagem em Z	0,012	mm
Quantidade de dressagem	1	
Rotação no rolo dressador	6000	rpm
Sentido de rotação no rolo dressador	Discordante	
Avanço dressagem corpo	140,0	mm/min

A refrigeração foi feita com óleo integral ECOCUT HFN 5B do fornecedor Fuchs, com uma vazão de 56 l/min com um bico refrigerante de tipo bico de pato direcionado até a peça e um segundo bico direcionado ao ombro objeto de estudo.

A retificação das peças foi realizada em várias etapas: Aproximação, desbaste, semiacabamento e acabamento, com o sobrematerial listado na Tab. 4

Tabela 4 Sobrematerial por etapa de retificação (Autor)

Etapa	Sobrematerial		Velocidade de avanço v_f (mm/min)	Velocidade periférica do rebolo	Velocidade de rotação da peça
	X (mm)	Z (mm)			
Aproximação	0,6	0,6	50	45 m/s	1050 rpm ou 1200 rpm
Desbaste	0,1	0,15	F_{Desb}		
Semiabamento	0,02	0,02	F_{SA}		
Acabamento	0	0	0,5		
Centelhamento	0	0	0		

Inicialmente a empresa se encontrava realizando a retificação com uma velocidade de avanço de mergulho de 7 mm/min, uma velocidade rotação da peça de 1100 rpm e com um rebolo de alumina fundida. Em função desses parâmetros iniciais foram propostos os seguintes valores dos fatores dos experimentos, para sua definição se previu (conforme resultados de pesquisas anteriores) um melhor desempenho dos rebolos de alumina microcristalina os quais permitam maiores velocidades de avanço de mergulho e de rotação da peça.

Tabela 5 Fatores e valores a variar durante a experimentação (Autor)

Número	Fator		Valores		
1	Velocidade de avanço (mm/min)	F_{Desb}	7	10	13
		F_{SA}	3	4,5	6
2	Velocidade de rotação da peça, n_w (rpm)		1050		1200
3	Rebolos		AA 80.3 K8 V11		3NQP 120 J6 VS3

A potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do cabeçote do rebolo foi medida através do equipamento Rexroth XM 21 IOT Gateway e um cartão de aquisição de dados de energia, conforme o apresentado na Fig. 3. Através do equipamento de medição da Fig. 4 foram coletados os dados de corrente (I), tensão (V) e fator de potência (cosφ) para cada uma das três fases que alimentam o motor de acionamento do cabeçote do rebolo, essa medição foi realizada cada 0,1 s durante o tempo de usinagem de todas as peças fabricadas. Conforme os dados obtidos foi calculada a potência elétrica consumida (P_e) e com o rendimento do motor (η) a potência mecânica (P_{mec}), as equações usadas foram as Eq. 3 e Eq. 4.

$$P_e = \sqrt{3} I V \cos\varphi \quad (3)$$

$$P_{mec} = \eta P_e \quad (4)$$

O diâmetro da haste foi medido utilizando um equipamento ótico Opticlíne C305 do fabricante JenOptik. E para a medição da profundidade do assento se usou um relógio comparador calibrado, conforme a Fig. 3.



Figura 3. Equipamentos de medição de potência elétrica (esquerda), de medição de diâmetros Opticlíne C305 (centro) e relógio comparador (direita)

Através do uso de medições dimensionais da matéria prima sem retificar e as peças finais retificadas foram calculadas os volumes de metal removido (V_w), por sua parte com as velocidades de avanço (v_f) e distância percorrida pelo rebolo foram calculados os tempos de usinagem e com esses dados os valores das taxas de remoção de material.

Em resumo, foi utilizada a metodologia da Fig. 4 para o cálculo dos parâmetros de estudo.

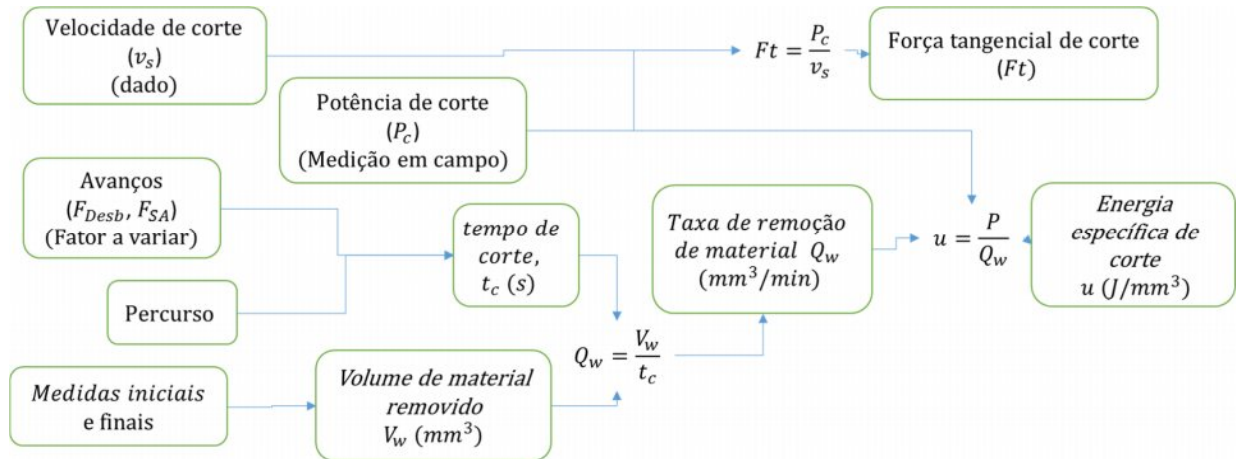


Figura 4 Cálculo das variáveis

Por cada configuração de fatores foram realizadas duas dressagens, cada uma de 25 peças e foram segregadas por configuração 12 amostras para medições dimensionais e 4 para medições de potência, força tangencial e energia específica de corte.

3. RESULTADOS

3.1 Medidas de controle

Os resultados do diâmetro da haste é apresentado na Fig. 5 e a profundidade do assento através da Fig. 6.

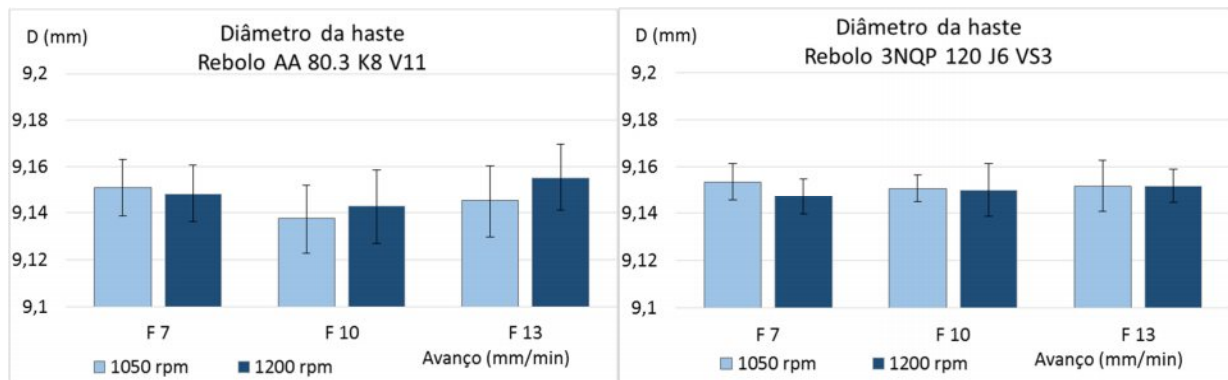


Figura 5 Resultados dos diâmetros do ombro

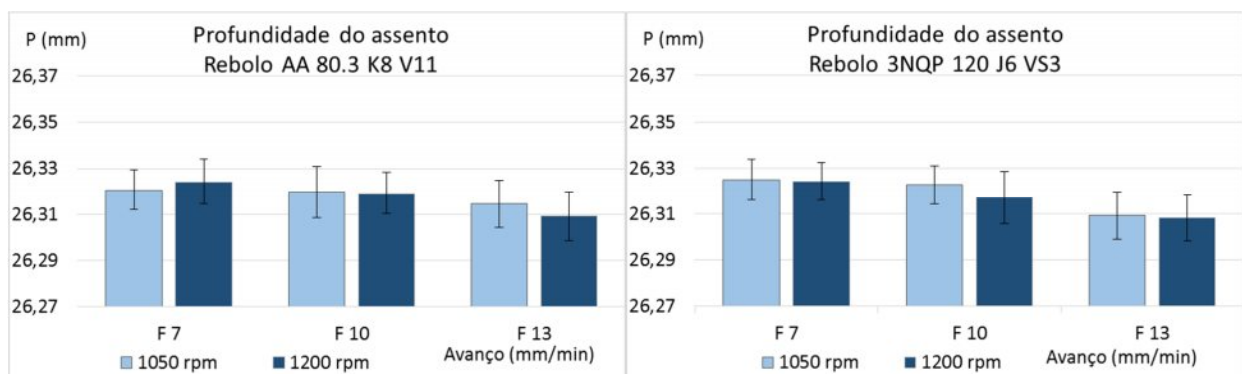


Figura 6 Resultados da profundidade do assento

Através dos resultados obtidos é possível observar que as tolerâncias requeridas foram atingidas adequadamente, sendo a medida de diâmetro nominal de $(9,15 \pm 0,05)$ mm e de profundidade do assento de $(26,32 \pm 0,05)$ mm. Existem algumas pequenas variações nas dimensões as quais podem dever-se ao processo de referenciamento do zero-peça. No entanto as dimensões finais foram atingidas através de todas as combinações de parâmetros e rebolos para um intervalo de confiança de 95%. Desta maneira se observa como as dimensões finais das peças não foram afetadas pelas variações dos parâmetros de corte, por outra parte devido à frequência de dressagem o desgaste dos rebolos foi mínimo evitando variações dimensionais significativas. Adicionalmente é importante notar que os parâmetros de corte variados correspondem às operações de desbaste e semiacabamento, nas quais acontecem os maiores consumo energético e maiores potências, dessa forma os parâmetros de corte no acabamento e no centelhamento se mantiveram constantes, o que também pode influenciar na precisão dimensional das peças finais.

3.2 Potência e força tangencial de corte

Conforme o procedimento apresentado anteriormente foram calculadas as potências de corte obtendo-se os resultados mostrados na Fig. 7.

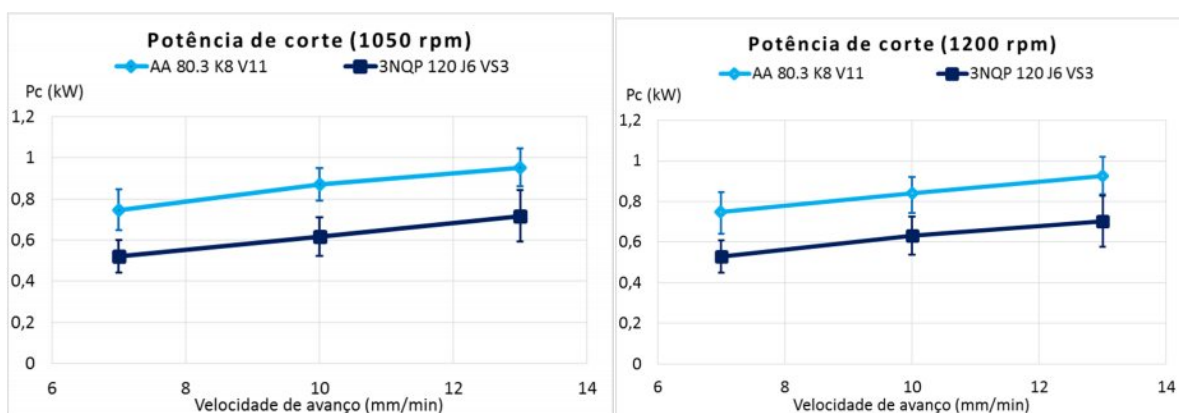


Figura 7 Resultados de potência de corte

Os valores obtidos da força tangencial de corte foram os mostrados na Fig. 8.

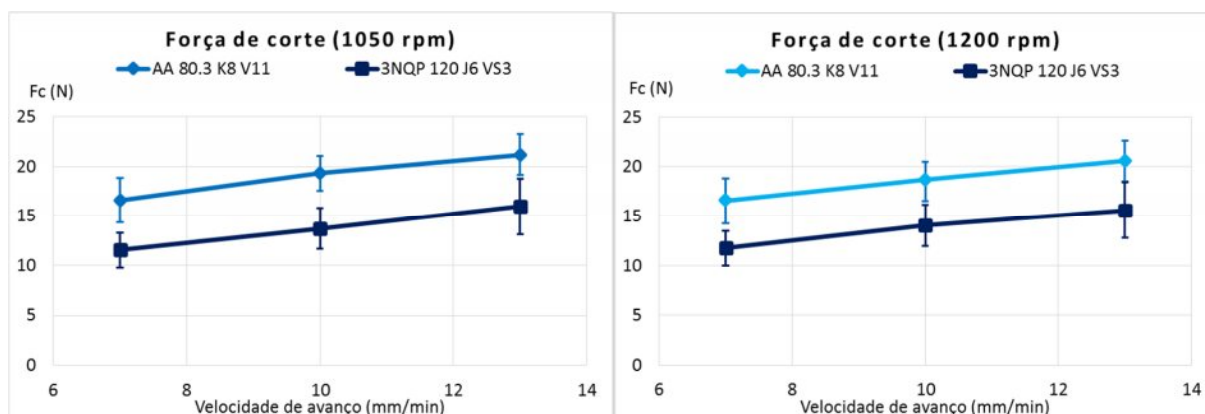


Figura 8 Resultados da força tangencial de corte

Dos resultados obtidos se observa uma maior potência necessária para o corte e também uma maior força tangencial de corte por parte do rebolo de alumina monocristalina. Analogamente se observa que o rebolo 3NQP 120 J6 VS3 teve o melhor desempenho, realizando a remoção de material com o menor consumo de potência e menor força tangencial de corte. Os resultados obtidos coincidem com outras pesquisas anteriores como Selvakumaran et al. (2018), Nadolny (2014), Starkov et al. (2014), Ben Fathallah et al. (2009) nas quais se observa que os abrasivos de alumina microcristalina tem uma maior capacidade de autoafiação e menor coeficiente de atrito, realizando um corte com menor consumo energético e maior eficiência. Isto ocorre devido à capacidade dos abrasivos microcristalinos de autoafiação associada às fraturas dos grãos abrasivos em partículas menores e a melhores propriedades tribológicas destes abrasivos.

Em relação aos parâmetros de corte, nota-se que a potência e a força tangencial de corte têm uma tendência a aumentar proporcionalmente em relação à velocidade de avanço, observando-se um aumento médio de 30 % na potência e força de corte ao aumentar a velocidade de avanço de 7 a 13 mm/min. Por outro lado, não houve uma variação significativa em relação à velocidade de rotação da peça. Estima-se que por causa do aumento da taxa de remoção de material, ocasionado

por maiores velocidades de avanço, os valores das potências de corte tendem a aumentar, estes resultados estão em concordância com pesquisas como as realizadas por Rowe (2014), Malkin (2008), Ben Fathallah et al. (2009).

3.3 Energia específica de corte

Seguidamente são apresentados os resultados da energia específica de corte na Fig. 9.

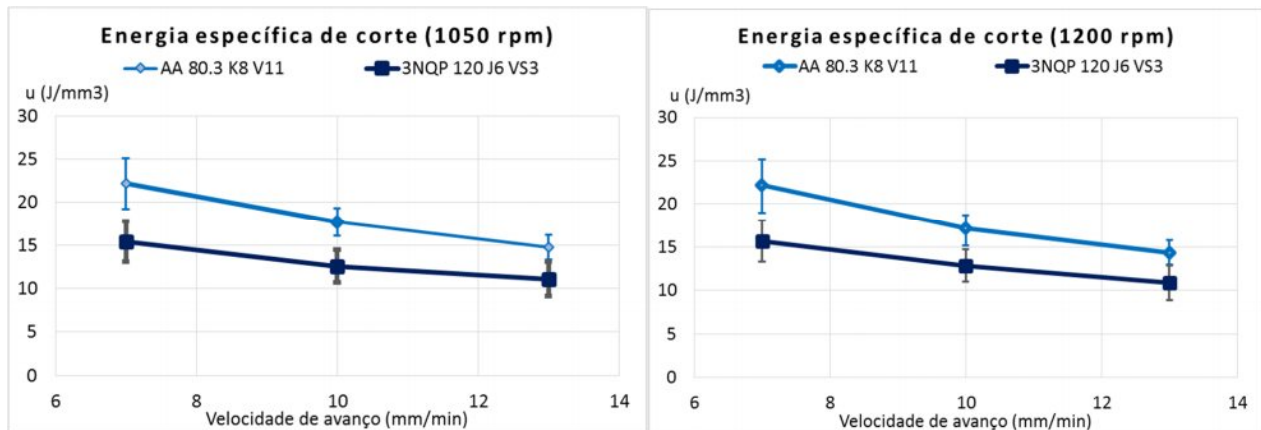


Figura 9 Resultados da energia específica de corte

Através dos resultados obtidos se observa uma menor energia específica de corte por parte dos rebolos de alumina microcristalina em comparação com seu par monocristalino. Além disso, nota-se uma tendência à diminuição da energia específica de corte com o aumento da velocidade de avanço de mergulho, evidenciando-se uma diminuição média de 32% ao aumentar a velocidade de avanço de 7 a 13 mm/min. Neste caso acontecem dois fenômenos em paralelo, por uma parte maiores velocidades de avanço tendem a aumentar a potência de corte, mas ao mesmo tempo diminui o tempo de corte, aumentando a taxa de remoção de material. Em pesquisas como as realizadas por Malkin (2008); Ben Fathallah (2009) e Choi e Subrahmanya (2008) observa-se que para maiores taxas de remoção de material a energia específica de corte tem uma diminuição, isto devido a que a componente da energia de formação de cavaco é relativamente maior em comparação com as componentes por sulcamento e por deslizamento.

4. CONCLUSÕES

O desempenho dos abrasivos de alumina microcristalina e monocristalino foi estudado e comparado através deste estudo para a retificação cilíndrica de mergulho do aço 18CrNi8 para uma velocidade de corte de 45 m/s. A análise foi focada em parâmetros como precisão dimensional das peças, potência e energia específica de corte, chegando às seguintes conclusões:

- Para os parâmetros de corte usados e os tipos de rebolos não se observou diferença significativa na precisão dimensional das amostras estudadas.
- Os rebolos de alumina microcristalina precisaram de uma menor potência de corte para remover o material. Além disso, observou-se um incremento da potência de corte com o aumento da velocidade de avanço de mergulho.
- Foi observado que os rebolos de alumina microcristalina apresentaram uma menor força tangencial de corte durante a usinagem. Adicionalmente, notou-se um incremento da força tangencial de corte com o aumento da velocidade de avanço de mergulho.
- Notou-se uma menor energia específica de corte na usinagem com rebolos de alumina microcristalina. Também se observou uma tendência à diminuição da energia específica de corte com o aumento da velocidade de avanço de mergulho.

5. REFERÊNCIAS

- BEN FATHALLAH, B. et al. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 49, n. 3–4, p. 261–272, 2009.
- CHOI, N; SUBRAHMANYA, H; LI, SHIN. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 48 p. 61–72, 2008.
- JACKSON, M; MILLS, B. Materials selection applied to vitrified alumina & cBN grinding wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 108, p. 114–124, 2000.

- KLOCKE, F. Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing and Lapping. Berlin: Springer, 2009. MALKIN, S.; GUO, C. Thermal analysis of grinding, Annals of the CIRP, v. 56, n. 2, p. 760–782, 2007.
- LIU, M; NGUYEN, T; ZHANG, L; WU, Q; SUN, D. Effect of grinding-induced cyclic heating on the hardened layer generation in the plunge grinding of a cylindrical component. International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 89, p. 55–63, 2015.
- MAYER, J; ENGELHORN, R; BOT, R; WEIRICH, T; HERWARTZ, C; KLOCKE, F. Wear characteristics of second-phase-reinforced sol–gel corundum abrasives. Acta Materialia v. 54, p. 3605–3615, 2006.
- NADOLNY, K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 74, p. 1445–1457, 2014.
- ROWE, W. Principles of Modern Grinding Technology. Londres: Elsevier, 2014.
- SELVAKUMARAN, D. et al. Performance Comparison of Sol-gel with White Alumina Abrasives for Grinding of Super Duplex Stainless Steel (SDSS). Procedia Manufacturing, v. 26, p. 1448–1458, 2018.
- STARKOV, V. K. et al. Comparative Analysis of Performance of Cubic Boron Nitride and Microcrystalline Alumina Tools in Profile Grinding of Form Cutters. Investigation of machining processes, v. 36, n. 1, p. 43–48, 2014.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF THE ALUMINA GRINDING WHEELS AND CUTTING PARAMETERS ON THE SPECIFIC CUTTING POWER AND ENERGY IN PLUNGE GRINDING OF DIN 18CrNi8 STEEL

Raynier Estrada Garrido

Milton Luiz Polli

Luciano De Oliveira Arantes

Federal Technical University of Paraná (UTFPR). Avenü Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba.
ing.raynierestrada@gmail.com, polli@utfpr.edu.br, lucianoarantes@hotmail.com

Abstract. Grinding is a process of special importance in the machining of mechanical parts that require demanding tolerances for precision applications. During grinding most of the energy consumed is converted into heat, which is why it is necessary to analyze values such as power, tangential force and specific cutting energy, parameters that due to their relationship with the generated heat are of importance to control changes in the mechanical properties of machined surfaces. In order to increase the efficiency and productivity of the industry, new abrasives have been developed, such as microcrystalline alumina, which allows cutting forces and energy consumption to be reduced. This research compares the performance of microcrystalline and monocrystalline alumina wheels for the cylindrical plunge grinding of 18CrNi8 steel, studying the influence on power, tangential force and specific cutting energy, of the feed speed, speed of rotation of the part and grinding wheel abrasive. In addition, the final dimensions of the parts were evaluated in order to achieve the required tolerances. Through the comparison between the performances of two cutting wheels it was possible to identify that the use of microcrystalline alumina abrasives has a tendency to decrease power, tangential force and specific cutting energy. In addition, it was observed that the increase in the feed speed provides an increase in the power and in the tangential cutting force and a tendency to decrease the specific cutting energy.

Keywords: External cylindrical grinding of plunge. Cutting power. Specific cutting energy. Microcrystalline alumina. Cutting parameters.

RESPONSIBILITY NOTICE

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