



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM GEOMETRIA INTERROMPIDA POR REBOLO CONVENCIONAL E REFRIGERAÇÃO OTIMIZADA

Diego Rafael de Mello¹, diego.rafa@hotmail.com
Hamilton Jose de Mello¹, hamilton@feb.unesp.br
Eduardo Carlos Bianchi¹, bianchi@feb.unesp.br
Paulo Roberto de Aguiar², aguiarpr@feb.unesp.br

¹ UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru – Departamento de Engenharia Mecânica, Bauru – São Paulo – Brasil.

² UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru – Departamento de Engenharia Elétrica, Bauru – São Paulo – Brasil.

Resumo: A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na indústria mecânica. No entanto, a maior parte das peças retificadas são aquelas que proporcionam corte contínuo (peça e rebolo não perdem o contato na região de corte). A fabricação de peças de precisão descontínuas é utilizada em vários componentes mecânicos, como a indústria automobilística, e têm sido encontrados poucos estudos sobre o que ocorre com a qualidade da peça (erros de circularidade e rugosidade nestes casos), e o desgaste do rebolo, na produção de partes simétricas rotacionais com corte interrompido, considerando a quantidade de impactos entre o rebolo e a peça. Além disso, na retificação, o calor gerado na zona de corte é extremamente elevado. Dessa forma, o uso de fluidos de corte é indispensável para que seja possível refrigerar tanto a peça quanto o rebolo. No entanto, estudos revelaram que os bocais convencionais (isto é, de sistemas convencionais de refrigeração) promovem a dispersão do fluido e requerem que o operador da máquina os posicione o mais próximo possível da interface peça/rebolo para minimizar esta dispersão. Devido a isto, na prática, boa parte do fluido é utilizada além do necessário durante o processo de retificação, implicando em maiores gastos com compra, armazenamento e tratamento do fluido. Ademais, um problema com a aplicação do fluido de refrigeração no processo de retificação está relacionado com a barreira de ar que se forma na periferia do rebolo devido ao seu movimento rotativo a altas velocidades. Assim, um modo prático de superar esta barreira de ar é aplicar o fluido na forma de um jato com velocidade igual à velocidade periférica do rebolo (velocidade de corte). Isto porque, conforme já estudado por outros pesquisadores, a velocidade do fluido igual à velocidade de corte do rebolo promove o rompimento da barreira aerodinâmica do ar ao redor do rebolo. O uso adequado dos fluidos implica em melhorias na operação de corte, propiciando uma maior produtividade. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo estudar a retificação de peças cuja geometria propicia o corte interrompido (peças com ranhuras), utilizando refrigeração otimizada e um rebolo convencional de óxido de alumínio com ligante vitrificado na retificação cilíndrica externa de mergulho de discos confeccionados em aço ABNT 4340, temperados e revenidos. Os corpos de prova apresentam duas, seis e doze ranhuras e foram retificados com três diferentes velocidades de mergulho do rebolo: 0,25 – 0,50 – 0,75 mm/min. A velocidade de corte foi mantida constante em 30 m/s e, para o método de refrigeração, foi utilizado um bocal com saída em formato retangular construído em aço ABNT 1010 galvanizado, sendo a velocidade do fluido (v_{fr}) igual à velocidade de corte do rebolo (v_c), isto é, $v_{fr} = v_c = 30$ m/s. Para um mesmo número de ranhuras, os valores da rugosidade, dos erros de circularidade e do desgaste diametral do rebolo tenderam a aumentar com o crescimento da velocidade de mergulho do rebolo. Em alguns casos, considerando os desvios-padrão encontrados, não foram observadas diferenças significativas quando retificados corpos de prova com duas, seis e doze ranhuras em uma mesma velocidade de mergulho.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica externa de mergulho, corte interrompido, refrigeração otimizada.

1. INTRODUÇÃO

Conhecida tradicionalmente como um processo de acabamento, a retificação cilíndrica externa de mergulho é uma operação amplamente utilizada em um ciclo de usinagem (Klocke *et al.*, 2005). Através desta operação, confere-se à peça características geométricas e dimensionais muito satisfatórias e dentro dos padrões desejados, com valores

reduzidos de rugosidade e de erros circularidade e valores mais precisos das dimensões e geometrias especificadas em projeto. Contudo, majoritariamente, estudos e/ou operações de retificação são baseados em corte contínuo, isto é, baseados na operação em que a ferramenta (rebolo) não perde contato com a peça na região de corte. No que se refere ao corte interrompido (processo em que ocorre perda de contato entre o rebolo e a peça na zona de corte, seja por ranhuras na peça, rebolo ou qualquer outra natureza de descontinuidade), há uma escassez de informações pelo fato de poucos ou nenhum estudo serem encontrados na literatura formal, no que se refere ao processo de retificação. Isto porque, de acordo com Diniz *et al.* (2005), o corte interrompido é usualmente estudado em processos mais convencionais de usinagem, tal como torneamento.

Quintana e Ciurana (2011) revelam que, nas recentes décadas, a tecnologia foi capaz de promover significativos avanços nos processos de usinagem, como a implementação de Comando Numérico Computadorizado (CNC) em máquinas operatrizes. Além disso, ainda segundo Quintana e Ciurana (2011), a dedicação ao estudo e à pesquisa foi muito importante para que se pudesse chegar a soluções inovadoras para problemas de produção, desenvolvimento de novos conceitos, materiais e ferramentas, para que a capacidade de produção fosse ampliada substancialmente.

Isso porque, embora os processos de corte e as máquinas operatrizes tenham se desenvolvido bastante, ainda há muito a melhorar e, no caso da retificação, Kim *et al.* (2013) esclarece que as máquinas-ferramentas de elevadas precisão e eficiência são de fundamental importância nos modernos processos de fabricação.

1.1. Objetivos

Ao final do processo de retificação por corte interrompido, verificar o comportamento da rugosidade, dos erros de circularidade e do desgaste do rebolo ao se variar o número de ranhuras dos discos feitos de aço ABNT 4340, temperado e revenido, utilizando refrigeração otimizada e rebolo convencional de óxido de alumínio com ligante vitrificado.

1.2. Corte Interrompido

Corte interrompido é caracterizado como o processo de corte no qual a ferramenta ora está em contato com a peça de trabalho (há arranque de cavaco), ora perde este contato (não ocorre arranque de cavaco) (Al-Zaharnah, 2006). Como exemplo, Sanches (2011) cita que no torneamento ocorre corte interrompido quando se usina uma peça bruta que não possui geometria cilíndrica, como uma barra de seção quadrada, ou quando a peça é cilíndrica, mas possui um rasgo de chaveta ou um furo transversal. Ainda pode ser citado o processo de fresamento, que é naturalmente uma operação por corte interrompido, uma vez que existem várias arestas de corte presentes na ferramenta que intercalam períodos de corte (remoção de material) e períodos sem contato com a peça (sem remoção de material), o que auxilia no processo de arrefecimento.

Al-Zaharnah (2006) ainda relata que o corte interrompido implica em acoplamentos e desacoplamentos entre a peça e a ferramenta que geram impactos entre ambas, podendo causar alterações na rugosidade da superfície usinada.

Já Kountanya (2008) concluiu que, em operações com corte interrompido, a temperatura de corte é menor que para operações a corte contínuo, porque os períodos intercalados de acoplamento e desacoplamento promovem resfriamento na região de corte.

1.3. Refrigeração Otimizada

O uso de bocais convencionais (isto é, de sistemas convencionais de refrigeração) promove a dispersão do fluido e requer que o operador da máquina posicione o bocal o mais próximo possível da interface peça/rebolo para minimizar esta dispersão. Devido a isto, na prática, boa parte do fluido é utilizada além do necessário durante o processo de retificação, implicando em maiores gastos com compra, armazenamento e tratamento do fluido (Webster *et al.*, 1995).

Um problema particular existente no processo de retificação é a alta velocidade do rebolo, a qual promove a formação uma barreira de ar na periferia do rebolo, e esta barreira impede que o fluido refrigerante penetre na região de corte. Assim, em geral, os métodos convencionais de refrigeração não são capazes de vencer esta barreira e penetrar de maneira eficaz na zona de corte, indicando que o fluido se dispersa e se deflete (Ebbrell *et al.*, 2000). De acordo com Webster *et al.* (1995), um modo prático de superar esta barreira de ar é aplicar o fluido na forma de um jato com velocidade igual à velocidade periférica do rebolo (velocidade de corte).

Além disso, otimizando o processo de refrigeração, aumenta-se a capacidade de lubri-refrigeração do fluido, o cavaco é removido mais facilmente da zona de corte e ocorrem menores dispersões do fluido na região de corte. Entretanto, o correto posicionamento dos bocais é imprescindível para que a aplicação do fluido de corte seja eficiente Ebbrell *et al.* (2000).

Portanto, o uso do fluido a altas velocidades oferece vantagens na melhora da capacidade de lubrificação e refrigeração na região de corte, reduzindo o carregamento mecânico no rebolo e melhorando os valores de rugosidade (parâmetro R_a). Dessa forma, pode-se dizer que as variáveis de saída do processo (rugosidade, desgaste do rebolo, entre outras) alcançam consideráveis melhorias ao se utilizar o método otimizado em comparação com o método convencional (Monici *et al.*, 2006).

2. MATERIAL E MÉTODO

A seguir, são apresentados os materiais e a metodologia utilizados para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

2.1. Material e Geometria dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (CPs) utilizados nos ensaios foram confeccionados em aço ABNT 4340 temperado e revenido, com dureza média de 54 HR_c. As Figs. 1, 2 e 3 ilustram os três tipos de corpos de prova usados nos experimentos.

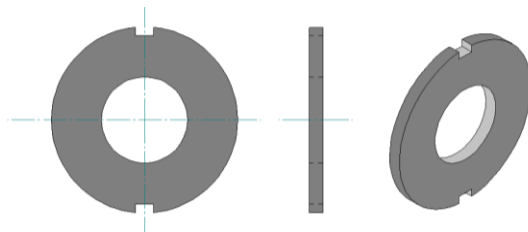


Figura 1. Corpo de prova com duas ranhuras

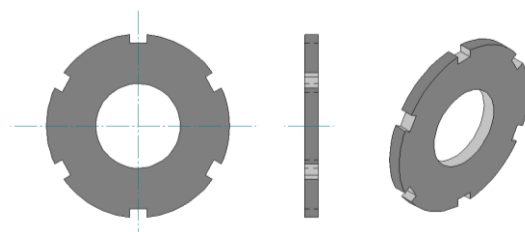


Figura 2. Corpo de prova com seis ranhuras

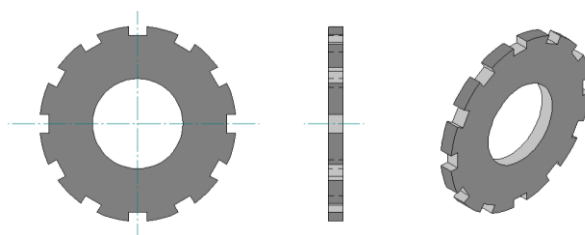


Figura 3. Corpo de prova com doze ranhuras

Os CPs passaram pelos processos de torneamento e fresamento, necessários para deixá-los com geometria e dimensões especificadas para, posteriormente, serem submetidos aos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento, atribuindo aos CPs melhor resistência mecânica (têmpera) e também boa tenacidade e alívio de tensões internas (revenimento). A escolha do material e dos tratamentos térmicos foi realizada tendo em vista a ampla utilização pela indústria deste material nestas condições.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, no qual o movimento de avanço é executado pelo rebolo em uma direção perpendicular à superfície usinada e, geralmente, o rebolo é mais largo que o comprimento da peça (DINIZ *et al.*, 2008). Tal operação pode ser comparada a um sistema massa-mola, visto que os movimentos de avanço do rebolo na peça provocam deformações elásticas na estrutura da máquina devido à falta de rigidez do sistema, sobretudo da máquina operatriz. Desta forma, torna-se necessário haver um período no qual não ocorra avanço do rebolo que é denominado tempo de spark-out ou tempo de centelhamento. Durante este tempo, as deformações elásticas são gradualmente eliminadas (recuperadas), removendo material e atingindo as dimensões desejadas (Baldo, 1994; Hassui, 2002).

Como fluido refrigerante, foi utilizado o óleo semi-sintético ME-1 concentrado, da empresa Tapmatic do Brasil Ltda., com diluição em 30 partes de água.

2.2. Rebolo Utilizado

O rebolo utilizado nos ensaios possui a seguinte especificação: RT 355 x 25,4 x 127 mm (diâmetro x espessura x furo); AA 100 L6 VS, onde AA: óxido de alumínio branco; 100: grão fino; O: dureza média; 6: estrutura; V: ligante vitrificado; S: Marca privada do fabricante.

2.3. Procedimento Experimental

Para a operação de retificação, foi utilizada a retificadora cilíndrica externa de mergulho CNC SULMECÂNICA RUAP 515H. O CP foi fixado em um mandril entre pontas na retificadora, de modo que o movimento de mergulho do rebolo fosse perpendicular à superfície a ser usinada. Antes do contato entre peça e o rebolo, ambos eram colocados em rotação, além de ser ligado o sistema de refrigeração otimizada. A velocidade de corte (v_s) do rebolo foi de 30 m/s e a velocidade da peça (v_w) de 40,4m/min. Cada corpo de prova teve remoção diametral total de 5 mm. Cada ensaio removeu 0,1 mm entre cada tempo de spark-out (aproximadamente 1 s) e as três velocidades de mergulho (v_f) utilizadas foram 0,25 - 0,50 - 0,75 mm/min para cada um dos três tipos de CPs.

Para a análise do desgaste diametral do rebolo, ao final de cada ensaio foram feitas impressões do perfil do rebolo em cilindros previamente torneados, utilizando velocidade de mergulho do rebolo de 0,25 mm/min e penetração no cilindro de 1 mm, sendo utilizada estes parâmetros por proporcionarem melhor precisão na leitura do desgaste do rebolo no cilindro. Com auxílio do rugosímetro Surtronic 3+, juntamente com o software Talyprofile da marca Taylor Hobson, mediu-se o desgaste do rebolo, por meio da impressão do perfil registrado. A Fig. 4 apresenta um tarugo desgastado pelo rebolo ao final de um ensaio e a Fig. 5 apresenta um exemplo da utilização do software do rugosímetro para a realização da medição do desgaste do rebolo.



Figura 4. Medição do desgaste diametral do rebolo

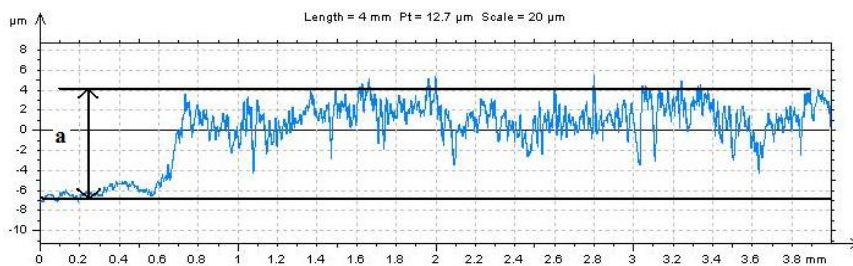


Figura 5. Exemplo do esquema de medição do desgaste do rebolo pelo software

Ao final de cada ensaio, os CPs foram submetidos a banhos em produtos químicos para serem limpos para a realização das análises de erro de circularidade e rugosidade. Com o auxílio de uma pinça (para não haver contato com a gordura das mãos), mergulharam-se os CPs nos seguintes banhos, obedecendo à sequência: querosene ou água raz; thinner; álcool etílico ou álcool hidratado; e álcool metílico.

O intuito desta sequência é fazer com que as impurezas mais grosseiras, como fluido refrigerante, sejam retiradas por solventes com maior poder de remoção, como é o caso do querosene e do thinner. Por conseguinte, os solventes de menor poder de remoção promovem uma limpeza mais refinada do material, e posteriormente, utiliza-se um secador para secar as peças. Dessa forma, os CPs apresentam-se prontos para serem submetidos às análises de erro de circularidade e rugosidade.

Para a medição de circularidade, cada CP foi colocado no equipamento, realizando-se 3 medições em cada um deles. Para cada medição, a posição inicial de contato da ponta apalpadora na peça diferia em 120° do ponto de contato anterior. Para a realização das análises de circularidade dos corpos de prova foi utilizado o equipamento Talyrond 31c da marca Taylor Hobson.

A medição da rugosidade (parâmetro R_a) se assemelha ao procedimento de medição da circularidade, isto é, foram realizadas 3 medições em cada CP, sendo uma feita a 120° da medição anterior. O rugosímetro utilizado nas análises foi o Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson.

2.3.1. Método de refrigeração otimizada

Para a utilização do método de refrigeração, foi utilizado um bocal com saída em formato retangular para que o jato do fluido refrigerante tenha uma menor dispersão. O bocal é construído em aço ABNT 1010 galvanizado e é apresentado na Fig. 6.

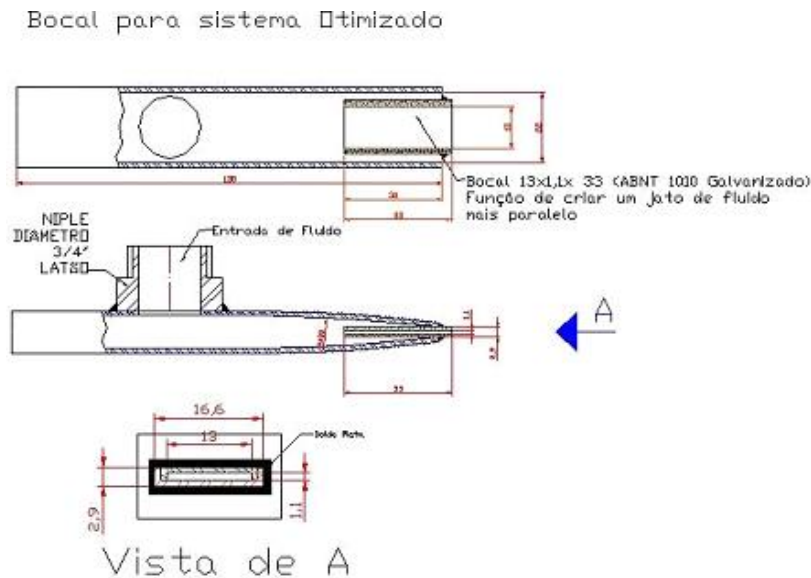


Figura 6. Bocal utilizado para o método de refrigeração otimizada (adaptado, Alves (2007)).

A velocidade do fluido (v_{fr}) era igual à velocidade de corte do rebolo (v_c), isto é, $v_{fr} = v_c = 30$ m/s. Isto porque, conforme já visto, a velocidade do fluido igual à velocidade de corte do rebolo promove o rompimento da barreira aerodinâmica do ar ao redor do rebolo.

O bocal foi posicionado de modo a atingir precisamente a região de contato (zona de corte) entre o rebolo e a peça, como mostrado na Fig. 7, sendo 50 mm a distância vertical entre a saída do bocal e a interface rebolo/peça.

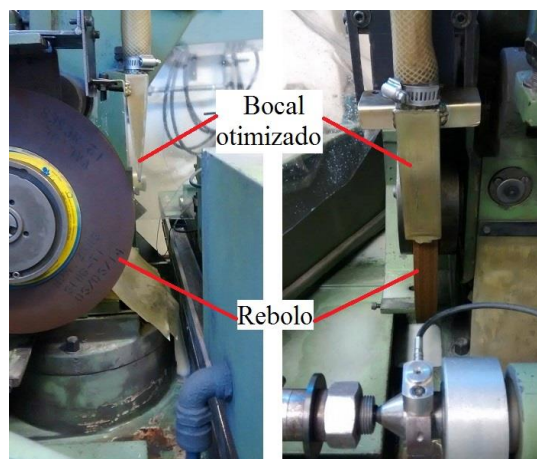


Figura 7. Posicionamento do bocal otimizado na interface rebolo/peça

A Fig. 8 mostra o arranjo utilizado para a medição de vazão do método otimizado. Foi utilizado um medidor de vazão modelo DMY-2030, marca CONTECH, para realizar o controle do fluxo, além de um medidor tipo turbina e válvulas de esfera.

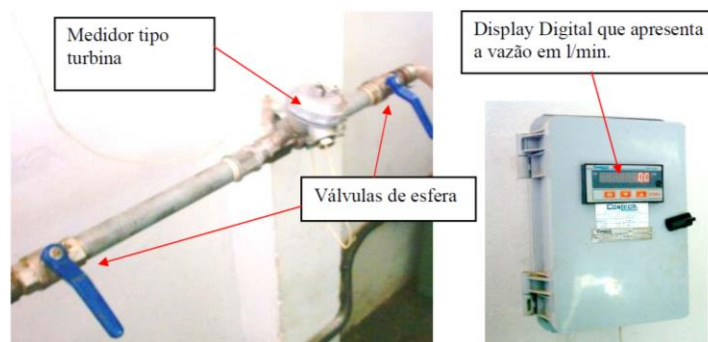


Figura 8. Arranjo do sistema otimizado para o controle do fluxo (Alves, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios. Os dados foram obtidos e analisados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB – UNESP).

3.1. Rugosidade

A Fig. 9 apresenta os valores de rugosidade superficial dos CPs (parâmetro R_a) em função das velocidades de mergulho e do número de ranhuras.

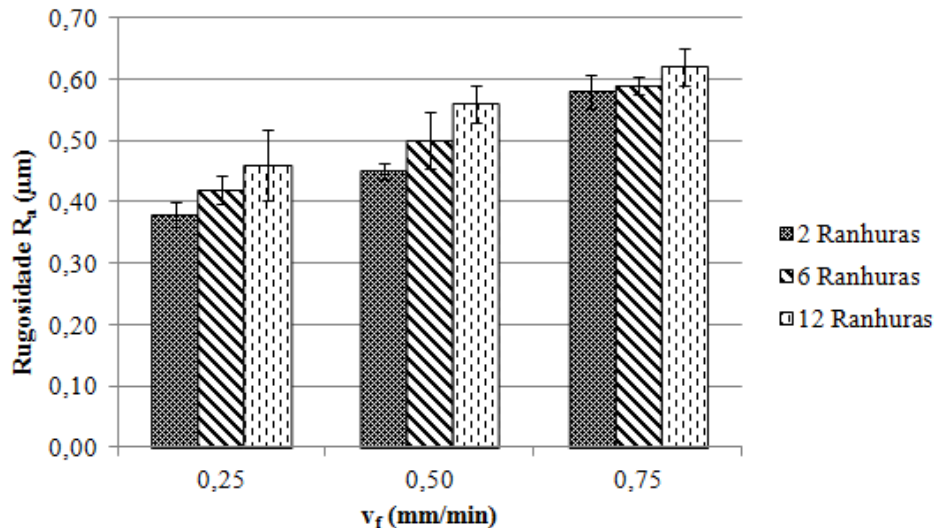


Figura 9. Rugosidade dos CPs em função da velocidade de mergulho do rebolo e do número de ranhuras

Verifica-se pela Fig. 9 que, para um mesmo número de ranhuras, a rugosidade tendeu a aumentar (piorar) conforme maior era v_f . Isso porque o aumento de v_f implica em maior severidade no corte, uma vez que o rebolo penetra e comprime a superfície da peça a taxas cada vez mais altas. Assim, os impactos ocasionados durante a retificação se tornam mais intensos com o aumento da v_f , ocorrendo o desprendimento de grãos do rebolo e/ou fratura do ligante, sendo que estas falhas na ferramenta contribuem para alterações da rugosidade, conforme relata Al-Zaharnah (2006) sobre os acoplamentos e desacoplamentos peça – rebolo, os quais geram de impactos entre tais elementos nos processos por corte interrompido.

Ao se analisar os diferentes números de ranhuras para uma mesma v_f , observa-se que a rugosidade foi maior com o aumento do número de ranhuras. Isso porque, quanto maior o número de ranhuras, maior é a frequência dos impactos entre a peça e o rebolo, ocasionando perda de qualidade superficial na peça. Tawakoli e Azarhoushang (2011) esclarecem, também, que os valores de rugosidade superficial em suas pesquisas para o corte interrompido foram levemente superiores aos valores referentes o corte contínuo e, segundo o pesquisador, isto se deve aos impactos entre a peça e o rebolo originados pela ocorrência de acoplamentos e desacoplamentos na zona de corte. Desta forma, o aumento na intermitência do corte (aumento do número de ranhuras) leva à degradação da rugosidade, podendo não atender às necessidades de projeto no que diz respeito à qualidade superficial.

Estatisticamente, de acordo com a Tab. 1, verifica-se que não houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de rugosidade encontrados. No entanto, observa-se que houve diferenças significativas entre os valores de rugosidade encontrados ao se comparar os diferentes números de ranhuras e, também, que houve diferenças significativas entre os valores de rugosidade encontrados ao se comparar as diferentes v_f .

Tabela 1 - Teste ANOVA para os dados de rugosidade

ANOVA - RUGOSIDADE						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Ranhuras	0,01816	2	0,00908	19,77419	2,87E-05	3,55456
v_f	0,14436	2	0,07218	157,16935	4,01E-12	3,55456
Interações	0,00477	4	0,00119	2,59677	0,071145	2,92774
Dentro	0,00827	18	0,00046			
Total	0,17556	26				

3.2. Erros de Circularidade

A Fig. 10 apresenta os resultados de erro de circularidade obtidos com os ensaios em função das velocidades de mergulho e do número de ranhuras.

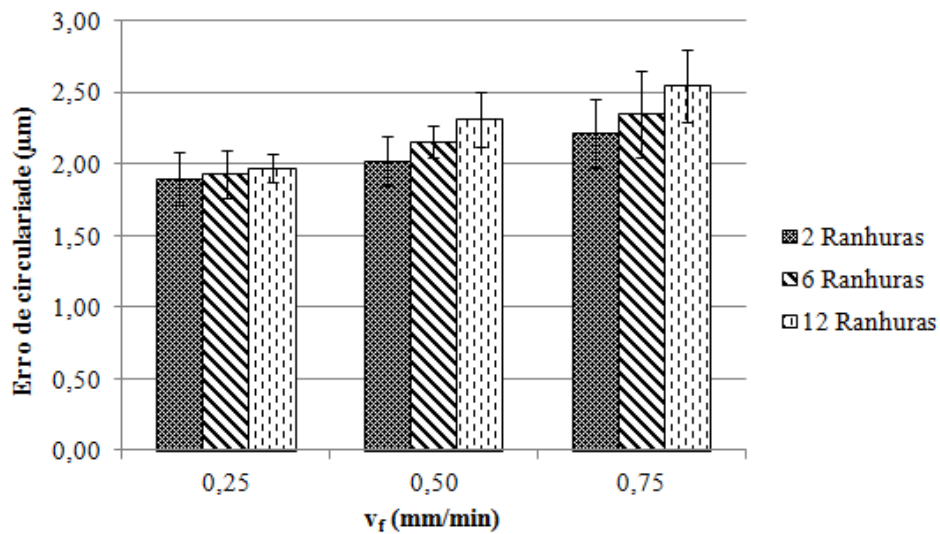


Figura 10. Erro de circularidade dos CPs em função da velocidade de mergulho do rebolo e do número de ranhuras

Observa-se pela Fig. 10 que, para um mesmo número de ranhuras, houve tendência de aumento do erro de circularidade conforme maior foi v_f . Isso se deve principalmente ao fato de a retificação trabalhar com o princípio de remoção de cavaco por meio da compressão da superfície que está sendo usinada. Desta forma, o aumento de v_f faz com que aumente a taxa pela qual a superfície da peça é comprimida, e este aumento na compressão contribui para que a peça sofra desvios do seu perfil circular (ideal), uma vez que o rebolo é “forçado” contra a superfície da peça.

Ao analisar uma mesma v_f , constatou-se que houve tendência de aumento do desvio de circularidade com o aumento do número de ranhuras. Quanto maior é o número de ranhuras, menor é o perfil externo (superfície a ser retificada) que, combinado com a compressão inerente ao processo de retificação e com os impactos entre peça e rebolo, facilita a ocorrência do desvio do perfil circular da peça. Isso porque os impactos presentes no processo promovem uma compressão intermitente da superfície da peça, podendo ser comparado, a grosso modo, com um martelo (rebolo) que se choca contra a superfície em uma frequência variável (proporcional ao número de ranhuras), isto é, com uma menor frequência para CPs com duas ranhuras e maior frequência para CPs de doze ranhuras.

Estatisticamente, de acordo com a Tab. 2, verifica-se que não houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de erro de circularidade encontrados. Também, observa-se que não houve diferenças significativas entre os valores de erro de circularidade encontrados ao se comparar os diferentes números de ranhuras. Contudo, verifica-se que houve diferenças significativas entre os valores de erro de circularidade encontrados ao se comparar as diferentes v_f .

Tabela 2 - Teste ANOVA para os dados de erro de circularidade

ANOVA - ERRO DE CIRCULARIDADE						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Ranhuras	0,24383	2	0,12191	2,49032	0,11097	3,55456
v_f	0,86316	2	0,43158	8,81578	0,00214	3,55456
Interações	0,06384	4	0,01596	0,32599	0,85685	2,92774
Dentro	0,88120	18	0,04896			
Total	2,05203	26				

3.3. Desgaste Diametral do Rebolo

A Fig. 11 apresenta os valores do desgaste diametral do rebolo em função das velocidades de mergulho e do número de ranhuras.

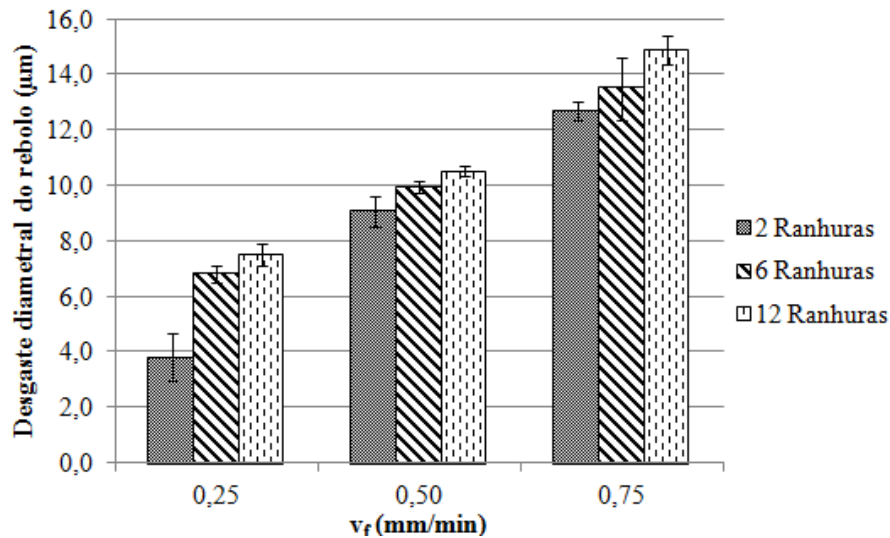


Figura 11. Desgaste diametral do rebolo em função das velocidades de mergulho do rebolo e do número de ranhura

A análise da Fig. 11 mostrou que, para um mesmo número de ranhuras, o desgaste diametral do rebolo tendeu a ser maior conforme maior era a velocidade de mergulho do rebolo. O aumento da velocidade de mergulho promove o arranque de cavaco de modo mais severo, visto que aumenta a taxa de compressão da superfície e, aliado aos impactos proporcionados pelas ranhuras, resulta em aumento do desgaste do rebolo. Liao *et. al* (2000) explica que o desgaste que ocorre com o rebolo está relacionado à quebra dos grãos abrasivos e à fratura do ligante, ambos decorrentes da deterioração térmica ou das severas solicitações mecânicas a que o rebolo é submetido.

Quando observada uma mesma velocidade de mergulho para diferentes números de ranhuras, obteve-se que o aumento do número de ranhuras levou ao aumento do desgaste do rebolo. Conforme descrito por Tawakoli e Azarhoushang (2011), ao aumentar o número de ranhuras, cresce também o número de impactos contra o rebolo devido aos acoplamentos e desacoplamentos entre a ferramenta e a peça, tornando a retificação mais severa. Assim, os grãos abrasivos são desprendidos mais facilmente do rebolo, intensificando o desgaste.

Do ponto de vista estatístico, é de acordo com a Tab. 3, observa-se que houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de desgaste diametral do rebolo encontrados.

Tabela 3 - Teste ANOVA para os dados de desgaste diametral do rebolo

ANOVA - DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Ranhuras	27,98850	2	13,99425	5647,90284	6,53E-26	3,55456
v_f	264,67914	2	132,33957	53410,58894	1,09E-34	3,55456
Interações	6,03499	4	1,50875	608,91181	6,11E-19	2,92774
Dentro	0,04460	18	0,00248			
Total	298,74723	26				

4. CONCLUSÃO

Dos resultados apresentados anteriormente, pode-se concluir que:

- Para um mesmo número de ranhuras, a rugosidade tendeu a aumentar (piorar) conforme maior era v_f , sendo que os maiores valores de rugosidade foram obtidos para $v_f = 0,75$ mm/min. Ao se analisar os diferentes números de ranhuras para uma mesma v_f , observou-se que a rugosidade foi maior com o aumento do número de ranhuras, com maiores valores de rugosidade para os CPs com 12 ranhuras. Estatisticamente, de acordo com a Tab. 1, verifica-se que não houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas

ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de rugosidade encontrados. No entanto, observa-se que houve diferenças significativas entre os valores de rugosidade encontrados ao se comparar os diferentes números de ranhuras e, também, que houve diferenças significativas entre os valores de rugosidade encontrados ao se comparar as diferentes v_f ;

- Para um mesmo número de ranhuras, houve tendência de aumento do erro de circularidade conforme maior foi v_f , com os maiores valores do erro de circularidade obtidos para $v_f = 0,75$ mm/min. Ao se analisar uma mesma v_f , constatou-se que houve tendência de aumento do erro de circularidade com o aumento do número de ranhuras, observando-se maiores valores do erro de circularidade para CPs com doze ranhuras. Estatisticamente, de acordo com a Tab. 2, verifica-se que não houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de erro de circularidade encontrados. Também, observa-se que não houve diferenças significativas entre os valores de erro de circularidade encontrados ao se comparar os diferentes números de ranhuras. Contudo, verifica-se que houve diferenças significativas entre os valores de erro de circularidade encontrados ao se comparar as diferentes v_f ;
- Para um mesmo número de ranhuras, o desgaste diametral do rebolo tendeu a aumentar conforme maior era v_f , com os maiores valores de desgaste para $v_f = 0,75$ mm/min. Ao se analisar os diferentes números de ranhuras para uma mesma v_f , verificou-se que o desgaste diametral do rebolo foi maior com o aumento do número de ranhuras, sendo obtidos os maiores valores de desgaste para os CPs com 12 ranhuras. Do ponto de vista estatístico, é de acordo com a Tab. 3, observa-se que houve interações entre o número de ranhuras e v_f , isto é, não houve diferenças significativas ao se comparar os diferentes números de ranhuras com as diferentes v_f no que diz respeito aos valores de desgaste diametral do rebolo encontrados.

5. AGRADECIMENTOS

Manifestamos nossos agradecimentos a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Processo 2013/04900-6) pelos recursos disponibilizados para esta pesquisa, a empresa SIVAT pela doação do rebolo e a empresa JSC Tratamento Térmico em Metais LTDA-EPP, pela têmpera e revenimento realizados nos CPs.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, Manoel Cleber de Sampaio. Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN. 2007.
- AL-ZAHARNAH, I. T. Suppressing vibrations of machining processes in both feed and radial directions using an optimal control strategy: the case of interrupted cutting. **Journal of materials processing technology**, v. 172, n. 2, p. 305-310, 2006.
- BALDO, Edimo Dudas. Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio de emissão acústica. 1994.
- DINIZ, A. E.; COPPINI, N. E. MARCONDES. FC Tecnologia da usinagem dos materiais. 6ª edição Editora MM. São Paulo, 2008.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; GOMES, Denilson Martins; BRAGHINI, Aldo. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. **Journal of materials processing technology**, v. 159, n. 2, p. 240-248, 2005.
- EBBRELL, S. et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 209-223, 2000.
- HASSUI, Amauri. Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho. 2002.
- KIM, Pilkee et al. Stability and bifurcation analyses of chatter vibrations in a nonlinear cylindrical traverse grinding process. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, n. 15, p. 3879-3896, 2013.
- KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability profile of hard cutting and grinding processes. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 22-45, 2005.
- KOUNTANYA, Raja. Cutting tool temperatures in interrupted cutting—The effect of feed-direction modulation. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 10, n. 2, p. 47-55, 2008.
- LIAO, T. W.; LI, K.; MCSPADDEN, S. B. Wear mechanisms of diamond abrasives during transition and steady stages in creep-feed grinding of structural ceramics. **Wear**, v. 242, n. 1, p. 28-37, 2000.
- MONICI, Rodrigo Daun et al. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 122-131, 2006.
- QUINTANA, Guillem; CIURANA, Joaquim. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363-376, 2011.
- SANCHES, Henrique Augusto Belizário. **Avaliação do processo de usinagem com corte interrompido utilizando a análise de esforços e frequências**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- TAWAKOLI, Taghi; AZARHOUSHANG, Bahman. Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 2, p. 112-119, 2011.
- WEBSTER, J. A. et al. Grinding fluid application system design. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 44, n. 1, p. 333-338, 1995.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

GRINDING OF AISI 4340 STEEL WITH INTERRUPTED CUTTING BY CONVENTIONAL GRINDING WHEEL AND OPTIMIZED COOLING

Diego Rafael de Mello¹, diego.rafa@hotmail.com
Hamilton Jose de Mello¹, hamilton@feb.unesp.br
Eduardo Carlos Bianchi¹, bianchi@feb.unesp.br
Paulo Roberto de Aguiar², aguiarpr@feb.unesp.br

¹ Univ. Estadual Paulista – UNESP – Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Postal Box 473, 17033-360, Bauru, SP, Brasil

² Univ. Estadual Paulista – UNESP – Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Postal Box 473, 17033-360, Bauru, SP, Brasil

Abstract. Grinding is one of the most used finishing processes in the metal cutting industry. However, the major part of the ground workpieces is provided by continuous cutting (workpiece and grinding wheel do not lose contact in the cutting zone). The manufacturing of precision workpieces using discontinuous cutting is common in several mechanical components, such as in the automotive industry, and few studies have been found about what happens with the workpiece quality (roundness errors and roughness), and with the grinding wheel wear, when rotational symmetric parts are manufactured with interrupted cutting, considering the amount of shocks between the grinding wheel and the workpiece. Moreover, in the grinding operation, the heat generated in the cutting zone is extremely high. Thus, the use of cutting fluids is essential to cool both the grinding wheel and the workpiece. Nevertheless, some studies have shown that the conventional nozzles (i.e., nozzles from conventional cooling systems) provide the spread of the fluid and it is required that the machine operator places them as close as possible from the interface workpiece – grinding wheel, in order to minimize the spread. Because of this, good part of the fluid is used beyond the necessary during the grinding process, resulting in greater costs with purchase, storage and fluid treatment. Furthermore, a problem about the application of the cooling fluid in the grinding process is the air barrier which is formed in the grinding wheel periphery due to its rotational movement in high speeds. Thereby, a practice way to overcome this air barrier is to apply the fluid in a jet form whose speed is equal to the peripheral speed of the grinding wheel (cutting speed). It because, as already studied by some researchers, the fluid speed equal to the cutting speed implies on the breaking of the aerodynamic air barrier around the grinding wheel. The adequate use of the fluids results in improvements in the cutting operation, providing greater productivity. Therefore, this paper aims to study the grinding of workpieces whose geometry provides the interrupted cutting (grooved workpieces), using optimized cooling and a conventional aluminum oxide grinding wheel with vitrified bond in the cylindrical external plunge grinding of discs made of AISI 4340 steel, quenched and tempered. The testing samples have two, six and twelve grooves and they were ground using three different infeed rates: 0.25 – 0.50 – 0.75 mm/min. The cutting speed was kept constant at 30 m/s and, for the cooling method, it was used a nozzle with rectangular output and made of AISI 1010 steel galvanized, being the fluid speed equal to the cutting speed. For the same number of grooves, the roughness, roundness errors and grinding wheel wear values tended to increase as greater were the infeed rates. In some cases, considering the standard deviations, significant differences were not observed when it was analyzed the same infeed rate for different number of grooves.

Keywords: cylindrical external plunge grinding, interrupted cutting, optimized cooling.