

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE NA QUALIDADE DA PEÇA RETIFICADA EM UM CICLO DE TRÊS ETAPAS

Dener Timóteo Silva (Aluno: Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)

Getúlio Aires Gonçalves (Aluno: Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)

Wanderley Xavier Pereira (Prof.: Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)
wpereira@unis.edu.br

Anselmo Eduardo Diniz (Prof.: UNICAMP-SP):
anselmo@fem.unicamp.br

Resumo: *Este trabalho aborda o processo de retificação em uma operação cilíndrica de mergulho. Seu principal objetivo é estabelecer os limites de velocidades de avanço (f) em cada uma das três etapas de retificação (desbaste, semi-acabamento e acabamento) para que a qualidade da peça ainda apresente resultados satisfatórios, procurando um melhor compromisso entre tempo e qualidade da peça. As condições de retificação foram inicialmente as recomendadas pelo fabricante e pela literatura. Posteriormente procurou-se variar as velocidades de avanço (f_1 , f_2 e f_3) isoladamente, ou seja, quando um desses avanços era a variável de entrada os demais eram mantidos constantes. As respostas estudadas, em cada uma das peças retificadas, foram rugosidade e circularidade. Finalmente, procurou-se testar uma condição de usinagem em que o tempo total ficasse reduzido em cerca de 20%. As principais conclusões deste trabalho foram: a) o avanço f_1 se mostrou mais influente na circularidade. b) a variação do avanço f_2 quase não alterou as respostas. c) o avanço f_3 produziu grandes alterações principalmente no acabamento da peça. d) no último ensaio, que reduziu cerca de 20% o tempo de operação, os resultados obtidos foram similares aos sugeridos pela literatura.*

Palavras-chave: *Retificação Cilíndrica de Mergulho, Avanço, Qualidade superficial da peça.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é principalmente utilizado quando se deseja a obtenção de tolerâncias apertadas, a melhoria do acabamento superficial e a garantia da integridade superficial de peças acabadas. Para isto é necessário que os parâmetros de usinagem sejam criteriosamente selecionados, pois fatores como seleção, vazão e concentração do fluido de corte, taxa de remoção de material (velocidades de avanços), parâmetros de dressagem, tipo de ferramenta, velocidade da peça e da ferramenta influenciam o resultado final da retificação. Neste sentido, vários pesquisadores buscaram um melhor entendimento do comportamento das variáveis sobre a qualidade da peça. Abrão (1991) pesquisou os gradientes de temperatura na região de contato entre ferramenta e peça, visto que a temperatura nesta região pode atingir níveis superiores a 1000°C e atingir profundidades da ordem de décimo de milímetro provocando perdas de propriedades mecânicas superficiais da peça como redução do limite de resistência à fadiga. Silva (2000) constatou que para determinadas condições de usinagem, o teor de óleo mineral no fluido de corte reduzia a força de corte no sentido

tangencial, reduzindo assim a temperatura de corte. Oliveira (1989) relacionou o desgaste do rebolo com a espessura de corte equivalente, e dos resultados observou que essas grandezas são inversamente proporcionais. Hahn e Lindsay (1986), demonstraram experimentalmente que a força normal de retificação é proporcional à taxa específica de remoção de material. Malkin (1989) apresentou o mecanismo de deformação elástica da peça e do eixo do rebolo envolvido no processo de retificação em função dos esforços inerentes ao processo e a partir do qual afirmou que a deformação elástica do sistema de causa uma remoção de material menor que a esperada para um avanço controlado pela máquina.

Dentre os processo de retificação o processo de retificação cilíndrica de mergulho é largamente utilizado nas indústrias e, como os outros processos de retificação, carece de melhor entendimento para a melhoria da qualidade da peça e para a minimização de seu tempo de ciclo, como já citado. Assim uma redução do tempo nesta operação sem perda da qualidade é sempre almejada, pois muitas vezes este processo se torna o gargalo em linhas de produção.

Este trabalho analisa o ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com três avanços, ou seja, um ciclo que possui uma fase de desbaste com uma velocidade de avanço f_1 que é a que consome o maior tempo da operação (cerca de 60%) e possui a maior taxa de remoção de material, (cerca de 93,4%) e a maior velocidade, depois uma fase 2 (f_2) que é uma operação de semi-acabamento que consome o menor tempo (cerca 10%) e retira aproximadamente 4,3% do sobre metal total e uma velocidade perto de 4 vezes menor que f_1 , e finalmente uma fase f_3 que é a operação de acabamento que remove cerca 2,3% do sobre metal total e consome quase 30% do tempo total de operação e uma velocidade perto de 16 vezes menor que f_1 (figura 1). Este ciclo é muito utilizado no meio industrial, principalmente quando se tem a presença de um medidor radial cuja função é indicar quando a peça atinge seu diâmetro programado para que o rebolo retorne a sua posição inicial.

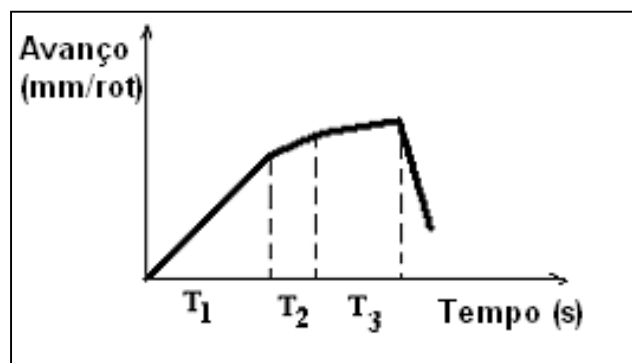


Figura 1: Esquema do ciclo de retificação cilíndrica com 3 fases.

De forma geral, o presente trabalho visa estabelecer os limites de velocidades de avanço (f) em cada uma das 3 fases do ciclo de retificação (desbaste, semi-acabamento e acabamento) para que a qualidade superficial da peça ainda apresente resultados satisfatórios, de forma a se obter um melhor compromisso entre a qualidade e o tempo de operação e ainda quantificar em qual das fases a qualidade superficial da peça é mais sensível às alterações das velocidades de avanço.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A máquina utilizada nos ensaios foi uma retificadora cilíndrica Zema Zselics série Kompakta G600, dotada de um CNC Fanuc 18 TC. Optou-se por trabalhar com retificação cilíndrica de mergulho, pois além de ser mais simples é a forma mais utilizada na indústria. A dressagem foi feita com um diamante dressador de ponta única. Este diamante apresentou uma largura, b_d , igual a 0,7 mm, medida a 0,03 mm da ponta (dimensão a ser usada como profundidade de dressagem). As condições de dressagem podem ser caracterizadas por um parâmetro denominado grau de recobrimento de dressagem U_d (Oliveira, 1988). Este parâmetro é a razão entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o passo de dressagem (S_d), conforme a equação (1).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (1)$$

Utilizou-se um U_d de 5 e como o b_d foi de 0,7mm o passo de dressagem foi de 0,14 mm. A medição de b_d foi feita utilizando-se um microscópio Leica Stereo Zoom 6 Photo, equipado com uma lente de ampliação e uma câmera CCD. A câmera estava acoplada a um microcomputador Pentium 133 MHz equipado com o programa Global Lab Image versão 3.1, que permite o processamento de imagens.

Os ensaios foram realizados utilizando-se um rebolo FE 38A80KVS da Norton Abrasivos, recomendado para afiação e retificação de diversos tipos de materiais. O abrasivo é o óxido de alumínio branco (linha FE 38 A), o grão é tamanho 80, a dureza K e a liga é vitrificada (V) com uma modificação (S), que deixa o grão abrasivo mais exposto, gerando menor risco de queima na peça. As dimensões dos rebolos são: 355,6 mm de diâmetro externo inicial, 50,8 mm de largura e 127 mm de diâmetro do furo. A velocidade periférica máxima recomendada para estes tipos de rebolos é 33 m/s. Nos ensaios, a velocidade periférica do rebolo foi constante e igual a 30 m/s.

Os corpos de provas utilizados eram de aço ABNT 4340 temperados e revenidos. A dureza média conseguida com o tratamento térmico foi de 56 HR_C. A figura 2 apresenta um croqui do corpo de prova utilizado. A retificação se dava nas partes do corpo de prova com 25 mm de largura.

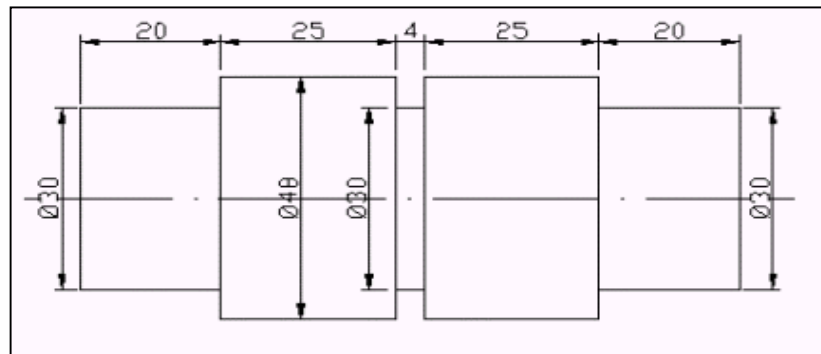


Figura 2: Corpo de prova utilizado nos ensaios.

Na primeira etapa dos ensaios foram retificadas 8 peças sob as condições recomendadas pelo fabricante (ZEMA, 1997) e pela literatura (Hassui, 1997). Nesta fase analisou-se o comportamento da qualidade superficial (rugosidade e circularidade) nas condições recomendadas para estabelecer futuras comparações com condições de diferentes velocidades de avanços. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de usinagem utilizados nesta etapa

Tabela 1: Condições de usinagem (Hassui, 1997; Zema Zselics, 1997)

Parâmetros de usinagem	Valores
sobre metal 1 (S_1)	0,28 mm
sobre metal 2 (S_2)	0,013 mm
sobre metal 3 (S_3)	0,007 mm
Avanço da fase (f_1)	0,007 (mm/volta)
Avanço da fase (f_2)	0,002 (mm/volta)
Avanço da fase (f_3)	0,0005 (mm/volta)
diâmetro da peça	44,1 (mm)
UD	5
centelhamento	0,55 (seg)

A velocidade da peça v_w foi constante e igual a 15 m/min, as dressagens foram efetuadas em 15 passadas com profundidade de 0,03 mm a cada passada do dressador. Os ensaios consistiam na retificação de 8 peças para cada condição, sem proceder à dressagem, medindo-se em cada peça os valores de rugosidade e circularidade. A rugosidade da peça foi medida em um rugosímetro Mitutoyo Surftest 211, ajustado com “cut-off” de 0,8 mm e padrão ISO (parâmetros Ra μm) tendo uma incerteza de 0,01 μm (mas vale lembrar que se trata de uma análise comparativa que os possíveis erros do equipamento de medição será extensiva a todas as medições). A medição foi realizada quatro vezes para cada corpo prova girando-o de 90° para cada medição. Já a medição de circularidade foi realizada girando-se a peça, presa entre pontos na máquina, com um relógio comparador milesimal (incerteza de 0,2 μm) apalpando a mesma.

As próximas etapas foram realizadas variando-se, inicialmente, a velocidade de avanço f_1 , depois f_2 e, por último, f_3 . Cada uma destas variáveis foram experimentadas em cinco níveis, sendo que para cada nível retificaram-se 8 peças, totalizando 40 peças retificadas para cada uma das 3 fases de avanços. As dressagens foram realizadas no início de cada réplica. A tabela 2 apresenta os valores dos níveis estudados em cada uma das 3 fases.

Tabela 2: Valores experimentais para 3 velocidades de avanço

	Níveis da velocidade de avanço (mm/rot)					Diâmetro da peça (mm)
f_1	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	43,8
f_2	0,00085	0,0013	0,00175	0,0025	0,003	43,5
f_3	0,00025	0,00035	0,00045	0,00055	0,00065	43,2

**Lembrando que os valores de f_1 , f_2 e f_3 foram respectivamente, 0,007, 0,002 e 0,0005 mm/rot quando tomados como constantes*

Finalmente, procurou-se analisar uma condição de usinagem em que se elevou o valor de f_1 para 0,009 mm/ rot e de f_2 para 0,0028 mm/ rot e reduziu-se o valor de f_3 para 0,00045 mm/ rot de forma que o tempo total de operação ficasse reduzindo em cerca de 17% em relação à condição inicial. Vale lembrar que o cálculo para tempo de operação se dá através da equação 2.

$$T_{fn} = \frac{S_m / 2 * \pi * D}{15000.f_n} * 60 \text{ (seg)} \quad (2)$$

Onde:

T_{fn} = é o tempo referente a uma determinada fase da operação de retificação, dado em segundos;

S_n = é o sobre metal referente a uma determinada fase dado em milímetro;

D = é o diâmetro da peça em milímetro;

f_n = é a velocidade de avanço de uma determinada fase dada em mm/ rot .

Nesta fase, retificou-se 8 peças (com diâmetros de 42,9 mm), ou seja, 8 réplicas, cujas condições experimentais e os tempos envolvidos em cada uma das fases do ciclo de retificação estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre as condições de retificação e do tempo envolvido.

Condições Iniciais		Condições Finais	
Parâmetros	Tempo (s)	Parâmetros	Tempo (s)
$f_1 = 0,007 \text{ mm/rot}$	10,78	$f_1 = 0,009 \text{ mm/rot}$	8,38
$f_2 = 0,002$	1,75	$f_2 = 0,0028$	1,25
$f_3 = 0,0005$	3,77	$f_3 = 0,00045$	4,19
Tempo total	16,3	Tempo total	13,82

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente procurou-se verificar o comportamento da rugosidade e da circularidade nas condições de usinagem recomendadas, para posteriormente comparar estes valores com condições mais lentas e com condições mais rápidas. A tabela 4 apresenta os resultados obtidos para rugosidade e circularidade desta etapa.

Tabela 4: Resultados obtidos para as condições recomendadas de retificação

Parâmetros de usinagem	Valores	Réplicas	Resultados Obtidos	
			Rugosidade (μm)	Circularidade (μm)
sobre metal 1 (S_1)	0,28 mm	1	0,47	1
sobre metal 2 (S_2)	0,013 mm	2	0,45	1
sobre metal 3 (S_3)	0,007 mm	3	0,51	1,5
Avanço da fase (f_1)	0,007 (mm/volta)	4	0,44	2
Avanço da fase (f_2)	0,002 (mm/volta)	5	0,53	1
Avanço da fase (f_3)	0,0005 (mm/volta)	6	0,49	1
diâmetro da peça	43,8 (mm)	7	0,46	1,5
UD	5	8	0,48	1
centelhamento	0,55 (seg)	Média	0,479	1,250
		D. Padrão	0,0304	0,378
		Coeficiente de variação	0,0634	0,30

Observa-se da tabela 4 que os resultados gerados entre as 8 réplicas apresentaram valores de rugosidade entre 0,45 e 0,50 μm e de circularidade em torno de 1 μm , que são bem coerentes com a natureza deste processo e ainda, que dispersão dos resultados dado pelo coeficiente de variação foi pequeno.

Na segunda etapa de análise dos resultados já com a finalidade de se conhecer o efeito da fase 1 na qualidade da peça, através da variação desta em cinco níveis, mantendo as demais condições constantes e iguais aos da etapa anterior, retificou-se 40 peças de forma que cada velocidade de avanço fosse experimentada 8 vezes. As figuras 3 e 4 apresentam os resultados desta etapa em

termos de rugosidade e circularidade, assim como o tempo envolvido em cada um dos avanços, onde M significa a média, dp o desvio padrão e t o tempo relativo a cada nível experimentado.

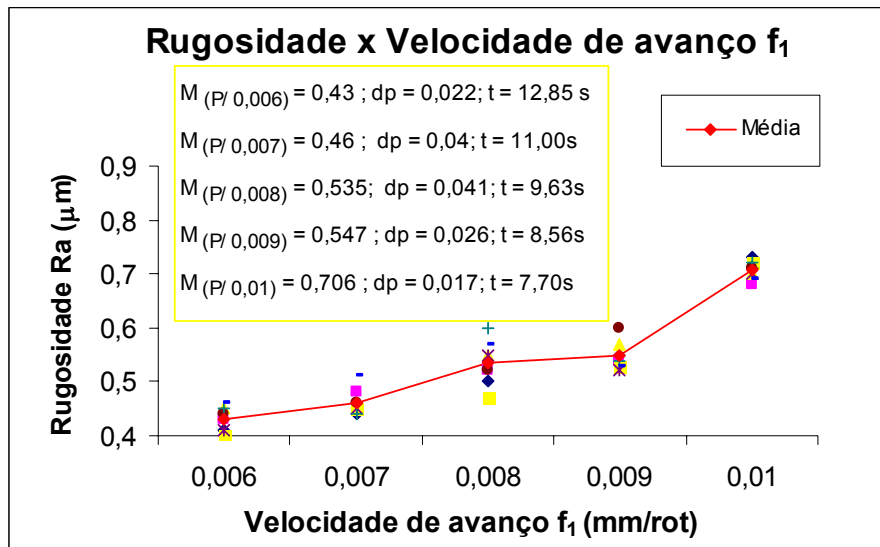


Figura 3: Rugosidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_1

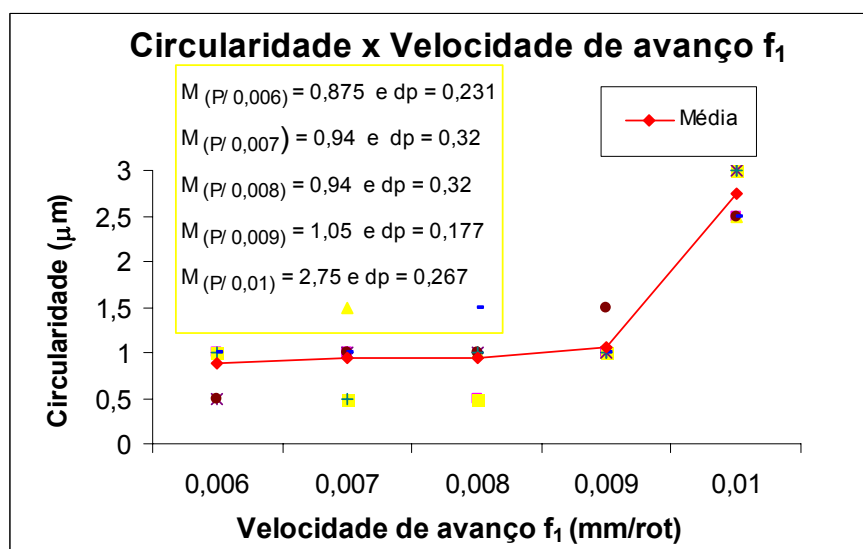


Figura 4: Circularidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_1

Da figura 3 nota-se que a medida que se eleva a velocidade de avanço da fase 1, a rugosidade cresce e atinge o maior valor quando se excede o valor de 0,009 mm, que se pode considerar o limite em que ainda a qualidade superficial esteja dentro de um padrão aceitável ($Ra = 0,6 \mu m$). Em relação ao tempo quando se passou de 0,007 para 0,009 (mm/rot) reduziu-se praticamente 2,5 segundos (23%) do ciclo. Desta forma conclui-se que menores rugosidades se consegue com maior tempo de operação e que a rugosidade se mostrou mais sensível a partir da velocidade 0,009 mm/rot. Um comportamento semelhante ocorreu com a circularidade (figura 4) a qual praticamente só foi alterada de forma significativa a partir da velocidade de 0,009 mm/rot, sendo que após esta velocidade a circularidade atingiu um valor fora dos níveis aceitáveis. Muito provavelmente neste ponto a intensidade do esforço imposto pelo avanço f_1 gerou vibrações e deformações no conjunto peça-ferramenta-máquina, que as fases posteriores (f_2 e f_3) não foram capazes de reduzir satisfatoriamente, elevando assim os valores de rugosidade e circularidade. Ainda observa-se da figura 4 que a circularidade foi mais sensível do que a rugosidade quando a velocidade de avanço

ultrapassou 0,009 mm/rot, demonstrando que a velocidade de avanço quando excessiva traz mais prejuízo ao erro de forma (dada pela circularidade) do que ao acabamento superficial da peça.

Na etapa seguinte dos ensaios variou-se a velocidade de avanço f_2 , também em cinco níveis, mantendo as demais condições constantes, para se verificar o efeito desta fase nas respostas rugosidade e circularidade, as quais estão mostradas respectivamente nas figuras 5 e 6.

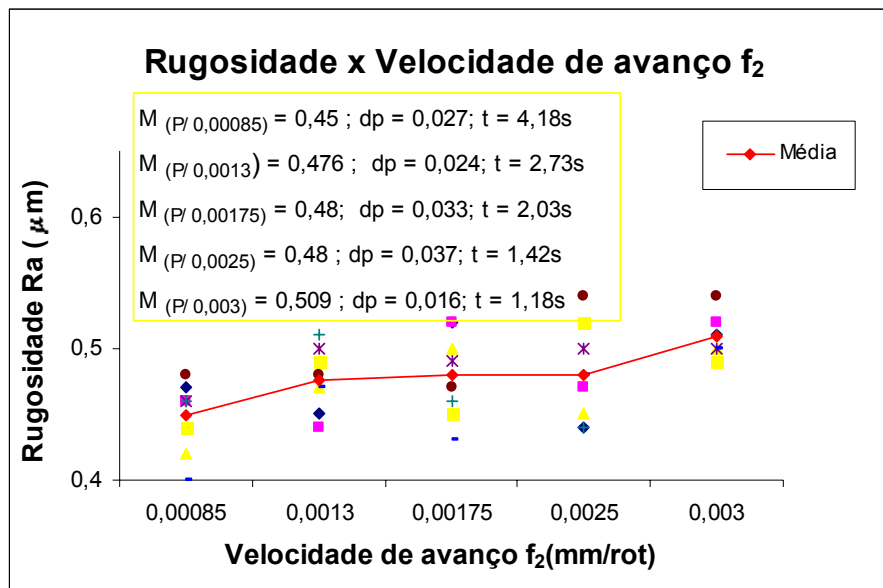


Figura 5: Rugosidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_2

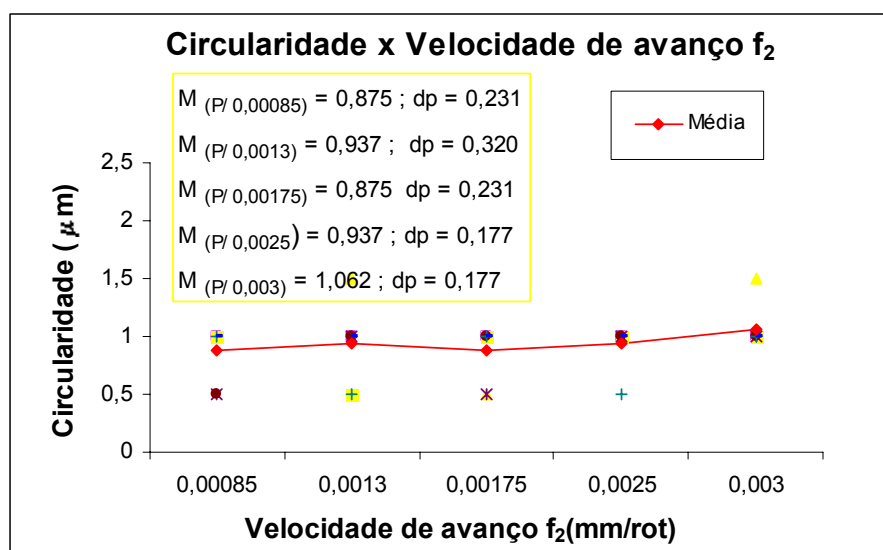


Figura 6: Circularidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_2

Observa-se na figura 5 que a influência de f_2 na rugosidade é pequena (bem menor que a influência de f_1) e na figura 6 que a influência de f_2 na circularidade é praticamente nula. Isto é devido ao fato desta fase ser a mais curta e intermediária entre o desbaste, que impõe grande deformação no sistema e a fase 3 que é a responsável pelo acabamento. Desta forma não se pode dizer que a qualidade superficial da peça será melhorada ou otimizada com apenas a redução da velocidade do avanço f_2 , podendo-se selecionar valores mais altos de f_2 .

Na penúltima fase dos ensaios, a velocidade de avanço referente a fase 3 foi estudada também em cinco níveis, cujos resultados estão sumarizados nas figuras 7 e 8.

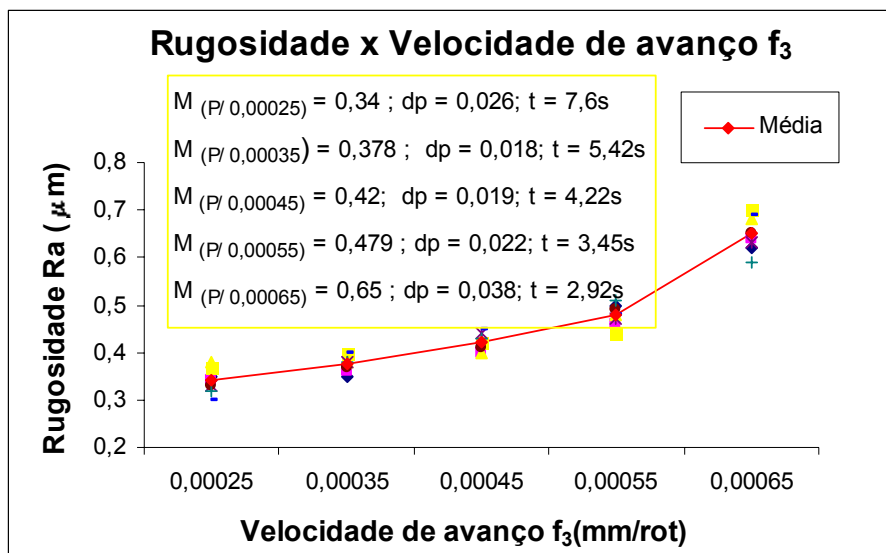


Figura 7: Rugosidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_3

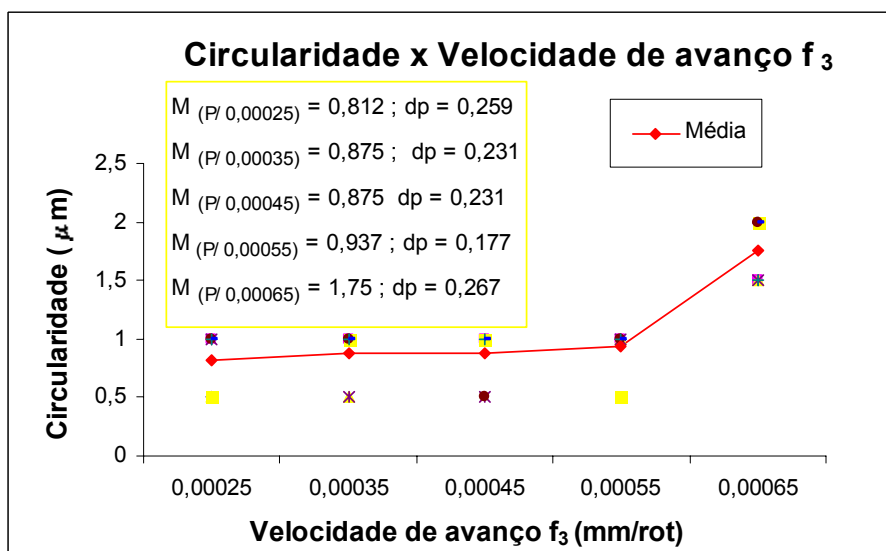


Figura 8: Circularidade para os 5 níveis da velocidade de avanço f_3 .

Nota-se da figura 7 que a rugosidade é bem sensível às alterações das velocidades de avanço f_3 , ou seja, se consegue reduzir a rugosidade de 0,48 para 0,34 μm reduzindo-se f_3 de 0,00055 para 0,00025 mm/rot, entretanto a custo de um aumento de 3,5 s no tempo total de operação. Se não houver necessidade de se reduzir o tempo em determinado sistema produtivo, pode-se trabalhar com menores velocidades de f_3 , por exemplo de 0,00025 mm/rot, e se obter uma melhor qualidade superficial. Já em relação à circularidade (figura 8) esta não se mostrou tão sensível quando a rugosidade, apresentando um acréscimo expressivo somente quando f_3 passou de 0,00055 mm/rot.

Na última etapa dos ensaios elevou-se os valores de f_1 de 0,007 para 0,009 (mm/rot), de f_2 de 0,002 para 0,0028 e reduziu-se o valor de f_3 de 0,0005 para 0,00045 mm/rot de forma que o tempo total ficasse reduzindo em aproximadamente 17%. Os motivos para estas alterações foram os resultados obtidos quando se variou f_3 , que se mostrou muito influente na qualidade. Daí pensou-se em reduzir esta velocidade e aumentar a velocidade da fase 1 que é responsável pela maior tempo de operação e também aumentar f_2 que quase não alterou a qualidade da peça, reduzindo o tempo de operação. A figura 9 apresenta os resultados obtidos.

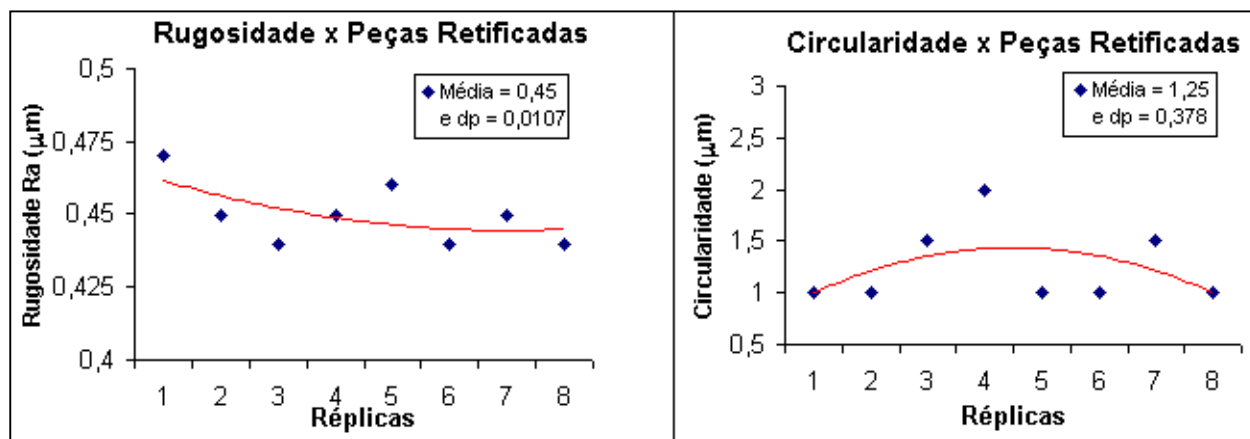


Figura 9: Rugosidade de circularidade da peça para um ciclo de retificação mais rápido

Nota-se da figura 9 que o valor médio da rugosidade ($0.45\mu\text{m}$) foi bem próximo do obtido sob as condições sugeridas pelo fabricante e pela literatura ($0.48\mu\text{m}$), o mesmo ocorrendo com a circularidade (neste caso não houve diferença entre as duas médias). A explicação para tal fato é que a fase 3 foi a que se mostrou mais influente na qualidade da peça e também ocupa um tempo substancial do ciclo. Assim, pode-se aumentar f_1 e diminuir f_3 de tal maneira a se ter ainda diminuição do ciclo e, mesmo assim, manter-se a qualidade da peça em termos de rugosidade e circularidade.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos em cada etapa, pode-se concluir para operações similares à utilizadas neste trabalho, que:

- O aumento da velocidade f_1 , mantendo as demais condições constantes, gerou aumento tanto no acabamento superficial da peça quanto na qualidade geométrica. A circularidade se mostrou mais sensível às alterações de f_1 do que a rugosidade quando se passou para o ultimo nível de f_1 estudado.
- O aumento da velocidade f_2 quase não alterou as respostas, gerando pequenos acréscimos de rugosidade e circularidade, exceto quando se utilizou o maior nível experimentado.
- A velocidade f_3 é a mais influente nos valores de rugosidade e circularidade, ou seja, um aumento da taxa de remoção de material nesta fase produz grandes alterações principalmente no acabamento da peça.
- o ensaio em que se procurou reduzir o tempo das fases iniciais f_1 e f_2 e aumentar o tempo da fase de acabamento f_3 gerando uma redução total de tempo de cerca de 17% gerou resultados similares às condições sugeridas pelo fabricante e literatura.

5. AGRADECIMENTOS

AGENA.- Na pessoa da Eng.ª Márcia Rios – Pela cessão dos fluidos de corte
 CAPES - Pelo auxílio financeiro
 SAINT GOBAIN ABRASIVES – Pela cessão do rebolo

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, A.M., 1991, “Sistema para Avaliação de Desempenho Térmico de Pares Rebolo-Peça em Retificação”, Dissertação de Mestrado EESC – USP.
- Hassui, A., 1997, “Comparação Sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação”, Dissertação Mestrado, FEM/UNICAMP
- Lindsay, R. P., King, R. I., Hahn, R.S 1986, “Principles of Grinding”. Handbook of Modern

- Grinding Technology . New York: Chapman and Hall, Chapter 2.
- Malkin, S., 1989, "Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives". Chichester: Ellis Horwood Limited, 275 p
- Oliveira, J. F. G., 1988, "Análise da Ação do Macroefeito de Dressagem de Rebolos no Desempenho do Processo de Retificação". Tese de Doutorado EESC - USP
- Oliveira J.F.G., Purquério, b.m., 1989, "Dressagem Controlada : uma solução para os problemas.", Máquinas e Metais, nº 283, pp. 58-66.
- Silva, E. J., 2000, "Análise da Influência dos Tipos de Fluidos de Corte e Rebolo na Retificação do Aço SAE HVN3", Dissertação de Mestrado, UNESP Bauru.
- Zema Zselics, 1997 "Manual de Operação Numérica- CNC Fanuc 18 TC", Industria de Máquinas Operatrizes Zema Zselics Ltda.

INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS ON THE GROUND WORKPIECE QUALITY WITH A THREE PHASE CYCLE

Dener Timóteo Silva (Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)

Getúlio Aires Gonçalves (Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)

Wanderley Xavier Pereira (Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG)
wpereira@unis.edu.br

Anselmo Eduardo Diniz (UNICAMP-SP):
anselmo@fem.unicamp.br

Abstract: *This work deals with the plunge cylindrical grinding process of steel workpieces. Its main goal is to establish the limits of feed velocity (f) in each one of the three grinding phases (roughing, semi-finishing and finishing), in order to obtain workpieces still with enough quality, trying to find a compromise between quality and cycle time. Initially, the grinding conditions were those recommended by the wheel manufacturer and by the literature. Later, feed velocities (f_1 , f_2 e f_3) were varied each at a time, i.e., when one of the feed was the input variable, the other ones were kept constant. The output variables were workpiece surface roughness and roundness. Finally, an experiment was carried out using a set of cutting conditions in such a way that the total grinding cycle could be reduced close to 20%. The main conclusions of this work were: a) the feed velocity f_1 was the most influent for the workpiece roundness. b) the f_2 variation almost did not influence the results. c) the change of feed velocity f_3 produced strong changes mainly on the workpiece surface finish. d) In the experiment in which the cycle time was reduced around 20%, the results were similar to those obtained with the conditions recommended by the literature*

Keywords: *Plunge cylindrical grinding, workpiece quality, grinding conditions.*