

# INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO PROCESSO NA QUALIDADE DE PEÇAS RETIFICADAS

Celso Minoru Hara

Anselmo Eduardo Diniz

Amauri Hassui

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação, 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail:

anselmo@fem.unicamp.br

## Resumo

A retificação é o processo de usinagem menos conhecido pelo pessoal que com ele trabalha no meio produtivo. O objetivo deste trabalho é entender a relação entre parâmetros de qualidade da peça retificada (rugosidade) e parâmetros do processo (velocidade da peça, avanço e espessura equivalente) em processo de retificação cilíndrica de mergulho. Para a consecução destes objetivos, retificou-se aço ABNT 52100, variando-se a velocidade da peça e o avanço. Após a retificação, as peças tinham suas rugosidades medidas. Dentre as várias conclusões, as principais foram: apesar de ter havido leve tendência de crescimento da rugosidade ao longo do tempo total de corte, pode-se afirmar que não houve relação direta entre rugosidade e velocidade da peça e nem entre aquela e o avanço; comparando-se condições diferentes de usinagem com espessuras de corte equivalente iguais, verificou-se que a rugosidade não se manteve constante.

**Palavras-chave:** Retificação, Monitoramento, Rugosidade

## Introdução

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um trabalho mais amplo, em que a principal finalidade foi verificar a eficácia da utilização de redes neurais artificiais “Back Propagation” para a análise de sinais provenientes de diferentes sensores. Esses sensores eram acoplados ao rebolo no processo de retificação cilíndrica de mergulho de aços, com o fim de se aumentar a confiabilidade da decisão automática do momento de dressagem do rebolo. Um segundo objetivo, que será objeto deste trabalho, foi verificar o comportamento de um parâmetro de qualidade da peça (rugosidade) à medida que se variavam a velocidade da peça, o avanço e o estado de afiação do rebolo. Para isso, diversos ensaios foram realizados, retificando-se aço ABNT 52100 endurecido por têmpera em diferentes condições de usinagem. O tempo de centelhamento adotado em cada corpo de prova foi de 10 segundos, que se revelou suficiente para a finalidade de medição da rugosidade da peça. Este tempo garantia que em todas as condições testadas o centelhamento fosse completamente realizado. As principais conclusões foram: não se observou nenhuma relação direta entre a rugosidade e velocidade da peça e nem entre aquela e o avanço; além disso, a

rugosidade não se manteve constante para condições de ensaio que apresentaram espessuras de corte equivalente iguais, ao contrário do que afirma a literatura.

### **Crítérios de Fim de Vida do Rebolo**

O fim de vida dos rebolos pode ser estabelecido através do surgimento de algum tipo de comportamento que implique dificuldade de remoção de material. BIANCHI, 1990, relacionou os principais critérios utilizados para definição do fim de vida do rebolo:

- perda da integridade superficial da peça: causada pelo aumento de temperatura da peça retificada;
- erros de forma: causados por distorções térmicas na peça (o que é típico de rebolos duros) ou perda diametral do rebolo não uniforme (típico de rebolos moles);
- vibração: se o rebolo se desgasta de uma maneira não uniforme, há a variação nas forças de corte, que gera aumento de vibração do sistema;
- rugosidade da peça retificada: quando os poros e vazios do rebolo são preenchidos com cavacos, a superfície é danificada, aumentando sua rugosidade. A vibração também pode ser geradora de um aumento da rugosidade;
- aumento excessivo das forças de corte: à medida que os grãos abrasivos se desgastam e os poros são preenchidos com cavacos, o atrito aumenta, causando o aumento nas forças de corte, com menor remoção de material.

HASSUI, 1997, mostrou que a rugosidade média pode ser usada como critério de fim de vida do rebolo, pois em seu trabalho ocorreu um crescimento de seus valores à medida que o rebolo se desgastava. No entanto, a circularidade não indicou o fim de vida do rebolo, levando-se em conta a regra prática de que a tolerância de forma é igual à metade da tolerância dimensional.

### **Espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ )**

A espessura equivalente de corte pode ser interpretada fisicamente como a espessura da camada de material que é removida pelo rebolo, com a velocidade periférica deste, e cuja taxa de remoção específica equivale à taxa de material que é retirada da peça no tempo. Em outras palavras, trata-se da espessura que teria uma fita de cavaco caso fosse possível retirá-la na retificação. Tal parâmetro pode ser definido pela expressão (1) (SNOEY et alli, 1971 – apud SHAW, 1996):

$$h_{eq} = a \frac{V_w}{V_s} \quad (1)$$

onde  $a$  é o avanço ( $f$ ) na retificação cilíndrica de mergulho e a espessura de penetração ( $a_e$ ) na retificação plana tangencial [mm],  $V_w$  é a velocidade periférica da peça [m/s] e  $V_s$  = velocidade periférica do rebolo [m/s]

PETERS e DECNEUT, 1975, apud VIEIRA, 1992, afirmam que esse parâmetro é o principal caracterizador da retificação, já que contempla três parâmetros de processo cujas influências isoladas sobre os resultados da retificação podem ser conhecidas. Como exemplo, a velocidade  $V_s$  é responsável pela chamada “dureza dinâmica” do rebolo. Quando se aumenta essa velocidade, o ângulo de penetração do

grão na peça diminui, fazendo com que os grãos abrasivos sejam menos sujeitos a esforços de corte, propiciando maior vida do rebolo. Assim, o comportamento do rebolo é tido como “mais duro”, já que os grãos ficariam mais tempo ligados à banda de corte do rebolo. No caso inverso, diminuindo-se  $V_s$ , o comportamento é o oposto e o rebolo pode ser tido como “mais mole”.

Diversos autores, citados por VIEIRA, 1992, concluíram que para quaisquer valores de processo que se escolham, pode-se antever os resultados da retificação, fixando-se o valor de  $h_{eq}$  desejado, pois forças de corte, vidas de ferramenta e rugosidade deveriam se manter dentro de uma mesma faixa de valores para um determinado valor de  $h_{eq}$ , independentemente dos valores de  $a$ ,  $V_w$  e  $V_s$ .

## **Materiais, Equipamentos e Procedimento Experimental**

O experimento foi dividido em duas etapas: a primeira variando-se o avanço e a velocidade da peça com critério de fim de ensaio de 40 peças (cerca de 6 mm de comprimento de avanço) e a segunda verificando a repetibilidade de algumas condições de usinagem.

Os ensaios consistiram na retificação cilíndrica de mergulho de aço 52100 endurecido por têmpera, com dureza de 58 HRC, quando se retirava um sobremetal de 0,3 mm no diâmetro e com as seguintes condições de corte:

- velocidade periférica da peça: 15 m/min, 17,5 m/min e 20 m/min
- avanço: 0,004 mm, 0,0055 mm e 0,007 mm

O rebolo utilizado teve as seguintes características:

- especificação: AA80J5V11
- dimensões: (406 x 125 x 50) mm
- velocidade do rebolo: 45 m/min

Condições de dressagem:

- velocidade de avanço de dressagem: 253,6 mm/min
- largura de atuação de dressagem  $b_d = 0,578$  mm
- grau de recobrimento do rebolo  $U_d = 5,0$

A rugosidade média  $R_a$  era medida num rugosímetro *Mitutoyo Surf test 211* com *cut-off* ajustado em 0,8 mm a cada cinco peças retificadas com a mesma condição de usinagem, tendo sido realizadas três medições em pontos equidistantes na mesma peça e efetuada sua média aritmética como valor representativo.

A figura 1 representa esquematicamente a montagem experimental.

## **Análise dos resultados de retificação cilíndrica**

### **Comportamento da Rugosidade ( $R_a$ )**

Conforme pode ser visto na figura 2 (Rugosidade ( $R_a$ ) versus Volume Específico de Cavaco), as seguintes tendências foram verificadas:

- houve uma leve tendência de crescimento do valor de Ra ao longo do tempo total de corte para quase todas as velocidades da peça, devido à perda de afiação dos grãos de rebolo. Porém, pode-se notar em alguns casos que a rugosidade não cresceu com o volume de cavaco removido (como quando  $V_w = 20$  m/min e  $f = 0,0055$  mm) ou cresceu e depois voltou a cair ( $V_w = 20$  m/min e  $f = 0,004$  mm).;

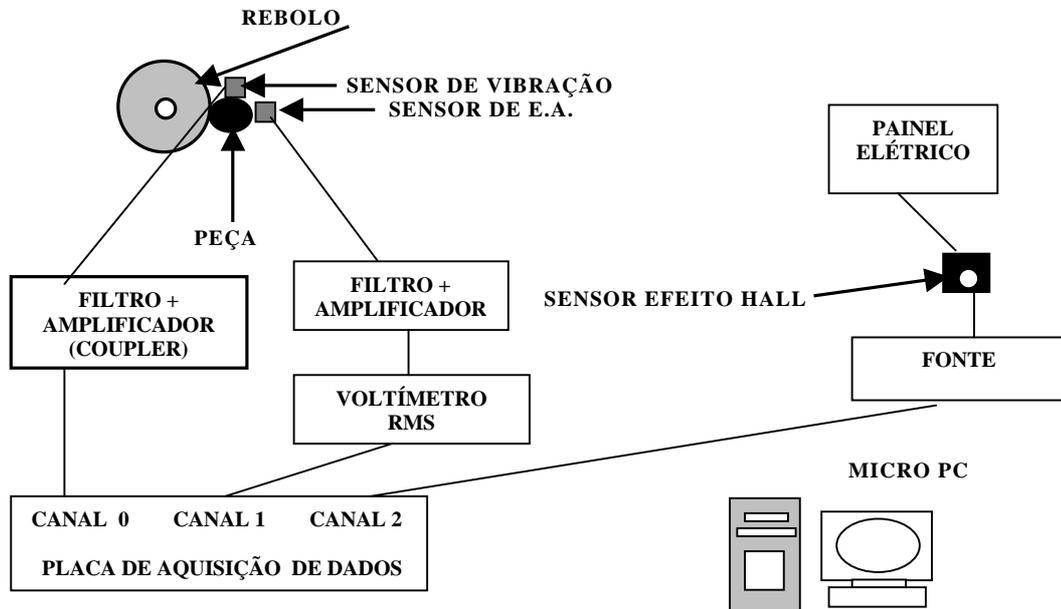


Figura 1 - montagem experimental

- não se observou nenhuma relação direta entre rugosidade e velocidade da peça. Vê-se que à maior velocidade (20 m/min) não se verificaram rugosidades maiores, ficando seus valores em uma faixa intermediária entre as duas menores velocidades até um volume específico de  $240 \text{ mm}^3/\text{mm}$ . A partir de então, a essa velocidade foram correspondidas as menores rugosidades observadas;

- igualmente, não se notou relação entre rugosidade e avanço. A comparação entre as curvas mostrou que para uma mesma velocidade o aumento do avanço não refletiu necessariamente em aumento da rugosidade. Ao invés disso, para as três velocidades ensaiadas, o efeito verificado pelo aumento do avanço de 0,004mm, passando por 0,0055 mm e por fim, 0,007 mm foi totalmente aleatório, não revelando nenhum tipo de padrão de comportamento identificável;

- esta independência da rugosidade com relação aos parâmetros de corte está ligada principalmente à etapa de faiscamento do rebolo. Como se sabe, ao fim do ciclo de retificação, o rebolo fica rodando parado na mesma posição radial (avanço igual a zero), mas, mesmo assim, a remoção de material continua, diminuindo a cada volta da peça, até atingir zero. Isto é devido à recuperação elástica do eixo do rebolo e da peça, deformados no início do ciclo, logo após o rebolo ter entrado em contato com a peça (MALKIN, 1989). Assim, no final da remoção de cavaco, quando o acabamento superficial da peça é definido, a operação não está mais com o avanço que teve durante todo o ciclo, mas sim com um avanço decrescente, que depende da rigidez do sistema;

- mesmo após as 40 peças usinadas (cerca de 6 mm de comprimento de avanço), a rugosidade ainda está em um nível bastante aceitável. Somente na condição  $V_w = 17,5$  m/min

e  $f = 0,0055$  mm houve um crescimento acentuado do valor de Ra, fazendo com que este parâmetro ultrapassasse  $0,6 \mu\text{m}$ , que é um valor tido como limite em operações de retificação. Nesta condição, pode-se levantar os seguintes pontos:

- 1) havia pouco macroefeito de dressagem no rebolo desde o início de corte (já que o grau de recobrimento do rebolo, era  $U_d = 5$ ). Assim, a rugosidade começa a crescer desde o início do ensaio, não havendo uma queda inicial devido à perda do macroefeito;
- 2) ao que parece, o grão do rebolo perde microefeito, e também ocorre empastamento do rebolo ao longo do tempo (a observação visual do rebolo, embora não seja totalmente confiável, pareceu corroborar com esta afirmação), o que gerou aumento na vibração e crescimento na rugosidade;
- 3) apesar disso a rugosidade se manteve em valores relativamente baixos (sempre abaixo de  $0,60 \mu\text{m}$ , mesmo com a tendência crescente).

Esses comportamentos citados 1) a 3) ocorreram em menor escala na maioria dos ensaios realizados. Porém, em alguns dos ensaios, esta tendência de crescimento não ocorreu, como no caso em que a condição era  $V_w = 20$  m/min e  $f = 0,0055$  mm, em que Ra se manteve praticamente constante ao longo de todo o ensaio. Muito provavelmente nestes casos, por alguma razão que não pôde ser observada, o empastamento do rebolo não ocorreu, possibilitando a estabilidade dos valores de Ra.

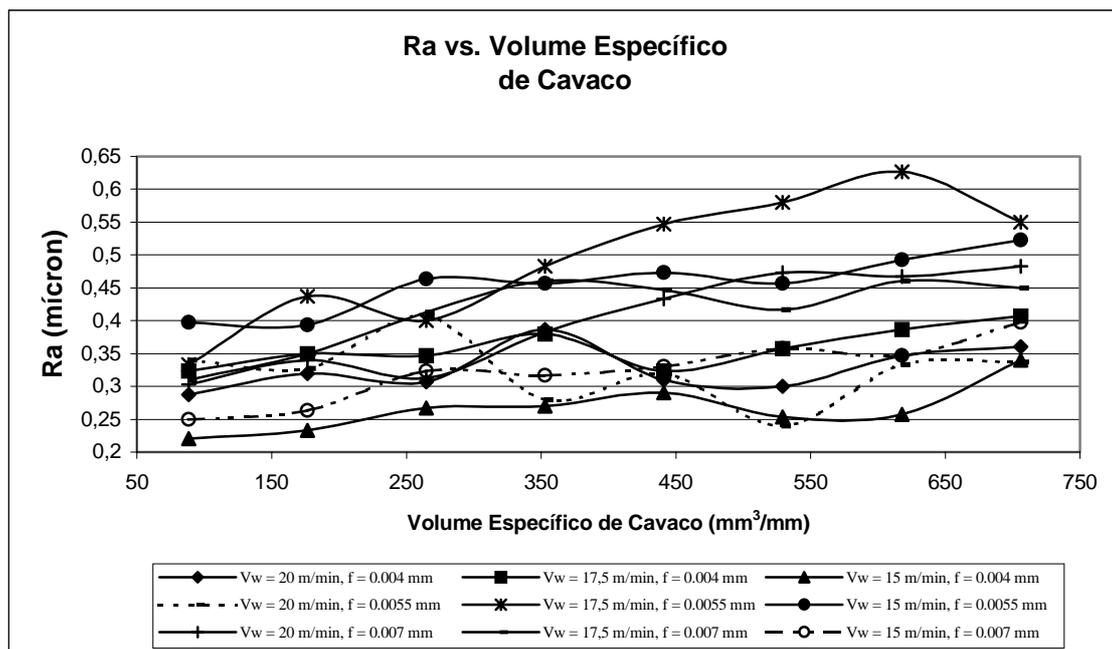


Figura 2 - Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) versus Volume específico de cavaco ( $\text{mm}^3/\text{mm}$ )

### Espessura de Corte Equivalente ( $h_{eq}$ ) X Rugosidade (Ra)

Quatro condições de usinagem puderam ser agrupadas em 2 pares específicos, já que ambos os pares apresentaram espessuras de corte equivalentes ( $h_{eq}$ ) muito próximas entre si, podendo-se aceitá-las como que quase idênticos.

O primeiro par com espessuras equivalentes aproximadamente iguais, refere-se às condições  $V_w = 20$  m/min,  $f = 0,0055$  mm e  $V_w = 15$  m/min e  $f = 0,0070$  mm, com  $h_{eq}$

aproximadamente igual a  $3,9 \times 10^{-5}$  mm (ver figura 3), e o outro par atende às seguintes condições:  $V_w = 20$  m/min,  $f = 0,004$  mm e  $V_w = 15$  m/min e  $f = 0,0055$  mm, com  $h_{eq}$  aproximadamente igual a  $3,0 \times 10^{-5}$  mm (ver figura 4). Dessas duas figuras, depreende-se que:

- apesar das espessuras de corte equivalentes serem praticamente iguais em ambos os pares de condições, a rugosidade não apresentou valores semelhantes em nenhum dos dois casos. Na figura 3, vê-se que os valores iniciais e as tendências das duas curvas foram distintas, havendo uma dispersão muito grande dos valores. Na figura 4, a ordem de grandeza da diferença entre os valores médios das duas curvas é relativamente alta, confirmando o que foi afirmado acima;

- Isto contraria a literatura que afirma que, dado um determinado valor de  $h_{eq}$ , a rugosidade se mantém constante, independentemente dos valores dos parâmetros que o formam ( $f$ ,  $V_w$  e  $V_s$ );

- A comparação entre as figuras 3 e 4 mostra que os valores de  $R_a$  estão em uma mesma faixa (entre 0,25 e 0,5  $\mu$ m), não importando a espessura equivalente utilizada. Isto demonstra que, para esta faixa,  $h_{eq}$  não influencia a rugosidade.

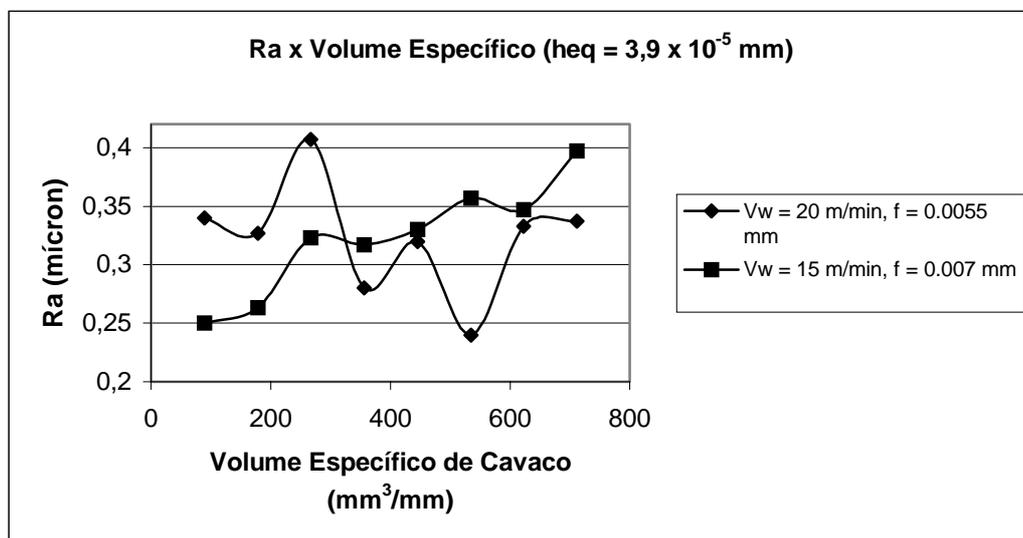


Figura 3 –  $R_a$  versus Volume de Cavaco (espessuras de corte semelhantes)

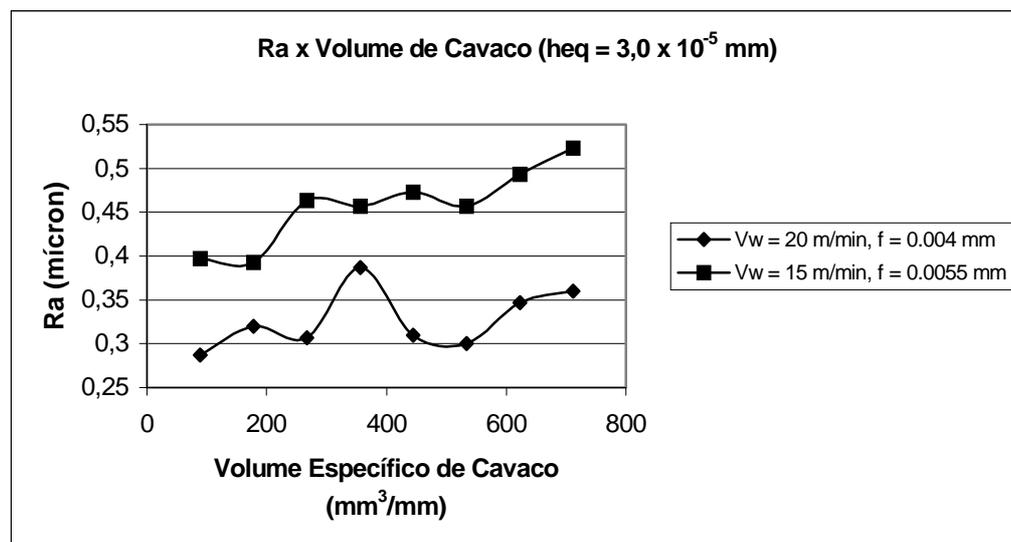


Figura 4 –  $R_a$  versus Volume de Cavaco (espessuras de corte semelhantes)

## Ensaio de Repetição (Segunda Etapa Experimental)

A figura 5 mostra a rugosidade (Ra) para uma das condições de ensaio repetidos em função do volume específico de cavaco removido e mostra que a repetitibilidade em processos de retificação cilíndrica de mergulho é muito difícil de ser obtida. Pode-se verificar, no entanto, que todas as curvas apresentaram tendências similares de crescimento de Ra com o volume específico de cavaco removido, apesar de estarem com níveis de Ra diferentes.

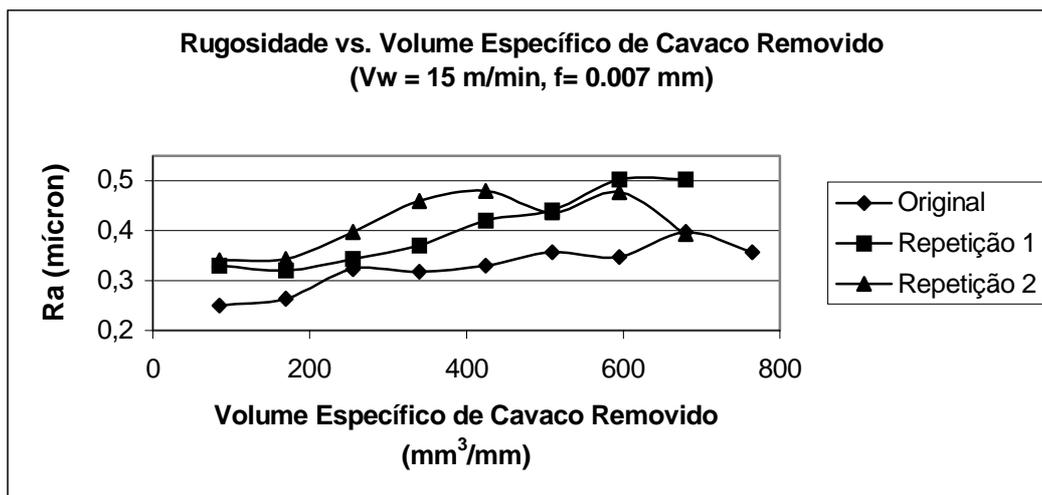


Figura 5 – Rugosidade x Volume Específico de Cavaco (ensaios de repetição)

## Conclusões

A partir do que foi visto, algumas conclusões se destacam e podem ser extraídas para as condições testadas neste trabalho:

- Houve leve tendência de crescimento da rugosidade com a evolução do tempo total de corte para a maioria das condições de usinagem testadas, causada pela perda da afiação dos grãos do rebolo;
- No entanto, em algumas condições, a rugosidade não cresceu com o volume de cavaco removido, apresentando um comportamento aleatório. Isso condiz com a conclusão de alguns autores e reforça a idéia de que a retificação é um processo difícil de ser controlado;
- Não houve relação direta entre rugosidade e velocidade da peça e nem entre rugosidade e avanço. Velocidades e avanços mais elevados não corresponderam necessariamente a maiores valores de rugosidade. Nenhum padrão de comportamento nítido foi observado;
- Não foram observados valores semelhantes de rugosidade para condições de usinagem com espessuras de corte equivalentes ( $h_{eq}$ ) iguais em nenhuma vez. Isso contraria a literatura, que afirma que nesses casos, os valores de rugosidade deveriam ser iguais;
- A rugosidade foi definida na fase de faiscamento, quando se processa a recuperação total das deformações elásticas do sistema. Dessa forma, a rugosidade independe totalmente das condições de usinagem, pois o é feito sem as mesmas condições de usinagem do restante do ciclo.

## **Agradecimentos**

Os autores deste trabalho prestam seus mais sinceros agradecimentos à FAPESP, pelo seu suporte financeiro, que possibilitou a consecução dos objetivos propostos.

## **Referências Bibliográficas**

BIANCHI, Eduardo Carlos, 1990, “Ação das Condições de Dressagem na Vida de Rebolos na Retificação de Precisão”, São Carlos: EESC, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado.

HASSUI, Amauri, 1997, “Comparação sobre a Utilização de Diferentes Sensores no Monitoramento do Processo de Retificação”, UNICAMP, Campinas (S.P.), Dissertação de Mestrado, , 103 pp.

MALKIN, Sergei, 1989, “Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives”, Chichester: Ellis Horwood Limited, 275 pp.

SHAW, Milton C., 1996, “Principles of Abrasive Processing”, Clarendon Press Oxford, N.Y., USA.

VIEIRA JR., Mílton, 1992, “Metodologia para Determinação das Condições de Usinagem e de Operação no Processo de Retificação”, Dissertação de mestrado, EESC, Universidade de São Paulo.