

# INVESTIGAÇÃO SOBRE O ACABAMENTO SUPERFICIAL DE PEÇAS USINADAS EM ALTÍSSIMA VELOCIDADE

## **Ian Faccio**

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos–EPUSP-Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, S. Paulo, SP - [ian.faccio@volkswagen.com.br](mailto:ian.faccio@volkswagen.com.br)

## **Marco Stipkovic Filho**

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos–EPUSP-Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, S. Paulo, SP - [kovic@osite.com.br](mailto:kovic@osite.com.br)

## **Gilmar Ferreira Batalha**

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos–EPUSP-Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, S. Paulo, SP - [gfbatalh@usp.br](mailto:gfbatalh@usp.br)

**Resumo:** *Um centro de usinagem vertical e ferramentas de metal duro foram utilizados para usinar com altíssima velocidade de corte corpos de prova de ferro fundido, para obterem-se parâmetros de rugosidade em relação a profundidade de corte. Uma relação entre estes valores pode ser encontrada, porém não o clássico aumento de rugosidade devido ao aumento da velocidade de corte.*

**Palavras chave:** *Usinagem, rugosidade, altíssima velocidade de corte.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A usinagem com altíssima velocidade de corte para peças de ferro fundido é uma oportunidade de melhoria para diversos aspectos de seus processos de usinagens convencionais. Não somente é possível reduzir custos, mas também aumentar a flexibilidade de linhas de manufatura onde uma ou mais operações podem ser substituídas por outras com altíssima velocidade de corte.

Uma tentativa para compreender o comportamento deste processo de fabricação, referente às suas relações entre seus parâmetros de corte (tais como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e suas características de peça acabada (como rugosidade, tolerâncias dimensionais e ondulações) é necessária.

Através deste esforço, melhores aplicações deste processo podem ser encontradas, e talvez outros processos de usinagem possam adequadamente ser substituídos por operações com altíssima velocidade de corte.

Nesta direção, outros autores consideraram substituir operações de retificação cilíndrica por torneamento em duro. É o caso de Tönshoff et al. (2000) and König et al. (1987). Eles sugerem que não apenas esta substituição é viável em termos de custo, mas também traz diversas melhorias para questões ambientais (torneamento em duro não necessita de fluidos refrigerantes) e para a flexibilidade de processos de manufatura (uma vez que a retificação cilíndrica é altamente inflexível).

Logo, caso fosse possível assegurar que existe qualquer conclusão melhor viabilizada pela possibilidade de um torneamento em duro com altíssima velocidade de corte, e através da análise das características de peça acabada, uma melhoria ainda maior pode ser obtida.

Em uma tentativa de atingir esta melhoria, este artigo se refere a análise da rugosidade de peças usinadas com altíssima velocidade de corte.

Uma comparação mais além entre este processo e outros é feita para esclarecer se é vantajoso utilizar operações com altíssima velocidade de corte ou não, relativamente à flexibilidade, custos e qualidade. Alguns dos itens sugeridos por Tönshoff et al. (2000) são apresentados para melhor compreensão.

Outro artigo, referente aos mesmos experimentos deste, descreverá a microestrutura dos corpos de prova após a usinagem com altíssima velocidade de corte, em uma tentativa para compreensão das condições do corte, seus mecanismos, a distribuição de temperatura e a transferência de calor da ferramenta para a peça.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Descrição dos corpos de prova e do equipamento

Três diferentes amostras de ferro fundido foram preparadas, para diversos cortes com altíssima velocidade de corte através de fresamento de topo. Suas composições são descritas abaixo, na Tabela 1:

Tabela 1: corpos de prova de ferro fundido. (figura 1a)

| corpo de prova | Microestrutura  |
|----------------|---|
| 1              | Ferro fundido cinzento, com matriz ferrítica - perlítica e grafita tipo D |
| 2              | Ferro fundido cinzento, com matriz perlítica e grafita tipo 1             |
| 3              | Ferro fundido nodular, com matriz perlítica e carbonetos dispersos.       |

Estes corpos de prova são extraídos de matrizes para estampos utilizados na indústria automotiva. A máquina utilizada para realizar as usinagens é um centro de usinagem vertical de alta velocidade Deckel Maho DMC 63V, com uma ferramenta de cinco insertos. Ferramentas Depo Fräsetechnik de metal duro, com diâmetro de 8 mm foram utilizadas. Abaixo podem se verificar fotos de um exemplo de estampo e do centro de usinagem.

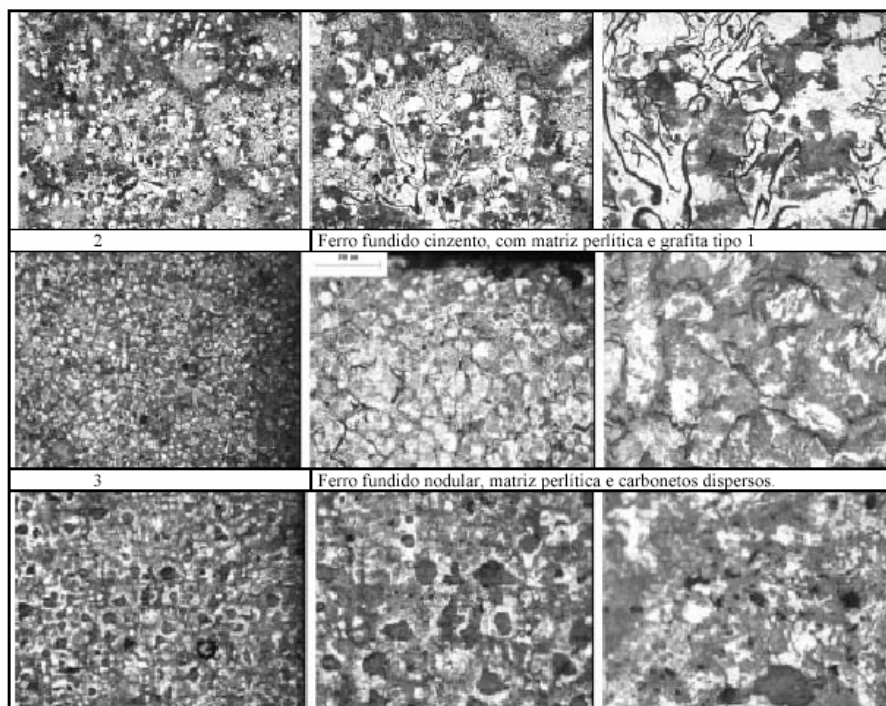


Figura 1-a – registro metalográfico dos corpos de prova usinados.

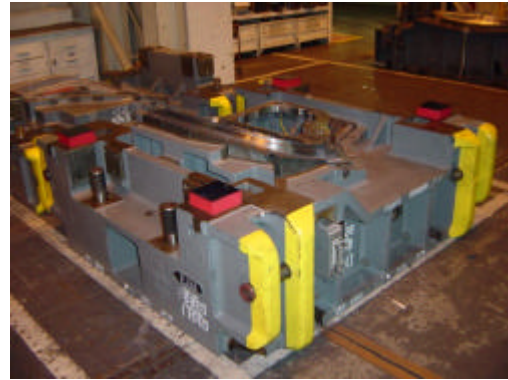
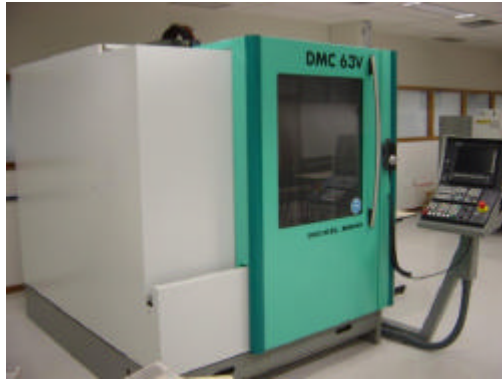


Figura 1b e c. - Exemplos ilustrativos do centro de usinagem utilizado (esquerda) e dos estampos que foram retirados os corpos de prova.

A rugosidade foi registrada através de um rugosímetro Surfcomer, modelo SE1700, com uma esfera apalpadora de raio 2mm. O nível de cut-off foi 2,5 mm, conforme sugerido pela norma DIN 4768. O espectro da rugosidade foi posteriormente analisado com um software matemático MatLab 5.3, através de uma plataforma PC.

Um microscópio Olympus BX60 conectado a um computador pessoal coletou os registros da microestrutura.

## 2.2. Descrição do procedimento experimental

Com os três corpos de prova descritos na seção 2.1, o centro de usinagem realizou 25 cortes, com diferentes profundidades de corte, para simular níveis de operações de usinagem como acabamento, intermediário e desbaste. O arranjo dos experimentos é descrito adiante, na Tabela 2:

Tabela 2. Descrição dos experimentos.

| Nº do Ensaio | Nº da amostra | Profundidade de corte (mm) | Operação de usinagem simulada | Nº do Ensaio | Nº da amostra | Profundidade de corte (mm) | Operação de usinagem simulada |
|--------------|---------------|----------------------------|-------------------------------|--------------|---------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1            | 1             | 0,1                        | Acabamento                    | 14           | 2             | 0,8                        | Intermediário                 |
| 2            | 1             | 0,25                       | Acabamento                    | 15           | 3             | 0,9                        | Intermediário                 |
| 3            | 1             | 0,4                        | Acabamento                    | 16           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 4            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 17           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 5            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 18           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 6            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 19           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 7            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 20           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 8            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 21           | 3             | 1                          | Desbaste                      |
| 9            | 1             | 0,5                        | Acabamento                    | 22           | 3             | 2                          | Desbaste                      |
| 10           | 2             | 0,5                        | Acabamento                    | 23           | 3             | 2                          | Desbaste                      |
| 11           | 2             | 0,5                        | Acabamento                    | 24           | 3             | 3                          | Desbaste                      |
| 12           | 2             | 0,6                        | Intermediário                 | 25           | 3             | 3                          | Desbaste                      |
| 13           | 2             | 0,7                        | Intermediário                 |              |               |                            |                               |

Os parâmetros de corte utilizados para os experimentos, além da profundidade de corte, foram:

- Velocidade de corte: 1000 m/min
- Avanço por faca: 6000 mm/min

Conforme os cortes foram realizados, seus espectros de rugosidade e os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$  e  $S_m$  foram coletados. Quatro gráficos diferentes puderam ser confeccionados, dispondo o parâmetro de rugosidade versus a profundidade de corte. Através do processamento matemático do espectro da rugosidade outro parâmetro de rugosidade pôde ser obtido, o momento espectral de quarta ordem ( $m_4$ ). Sua definição matemática é descrita abaixo:

$$m_4 = AVG \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Para esta equação,  $AVG(f)$  significa a média dos valores descritos por  $f$ , em um dado intervalo. Este intervalo pode ser descrito como o espectro de rugosidade coletado,  $y$  é a altura dos picos, tomada sobre a distância definida por  $x$ . Então, para cada experimento um  $m_4$  diferente foi encontrado, e assim como nos outros gráficos, o momento espectral de quarta ordem foi disposto versus a profundidade de corte.

As superfícies das amostras foram reagidas com Nital em uma solução de 10%, para expor a microestrutura. Três fotografias foram tiradas para cada amostra: uma com um aumento de 100 vezes, outra de 200 vezes e uma terceira de 500, resultando em nove fotografias da microestrutura após os experimentos com altíssima velocidade de corte.

### 2.3. Resultados e discussão

Para confeccionar os gráficos que abaixo representam os resultados, a seguinte metodologia foi adotada: uma reta média foi traçada entre todos os pontos do gráfico. Duas outras retas paralelas a esta média foram então traçadas, sobre os valores máximo e mínimo observados. A região dentro destas duas fronteiras paralelas (descritas com linhas tracejadas, enquanto que a reta média é contínua) representa os valores possíveis para esta operação. Além disso, para estabelecer a divisão entre valores possíveis e valores comuns para esta operação, outras duas retas paralelas foram traçadas, entre a reta de máximo e a média, e entre a reta de mínimo e a média. Estas medianas puderam então isolar a região de valores comuns (descrita como a área cinzenta nos gráficos) dos valores possíveis. Os gráficos podem ser observados a seguir:

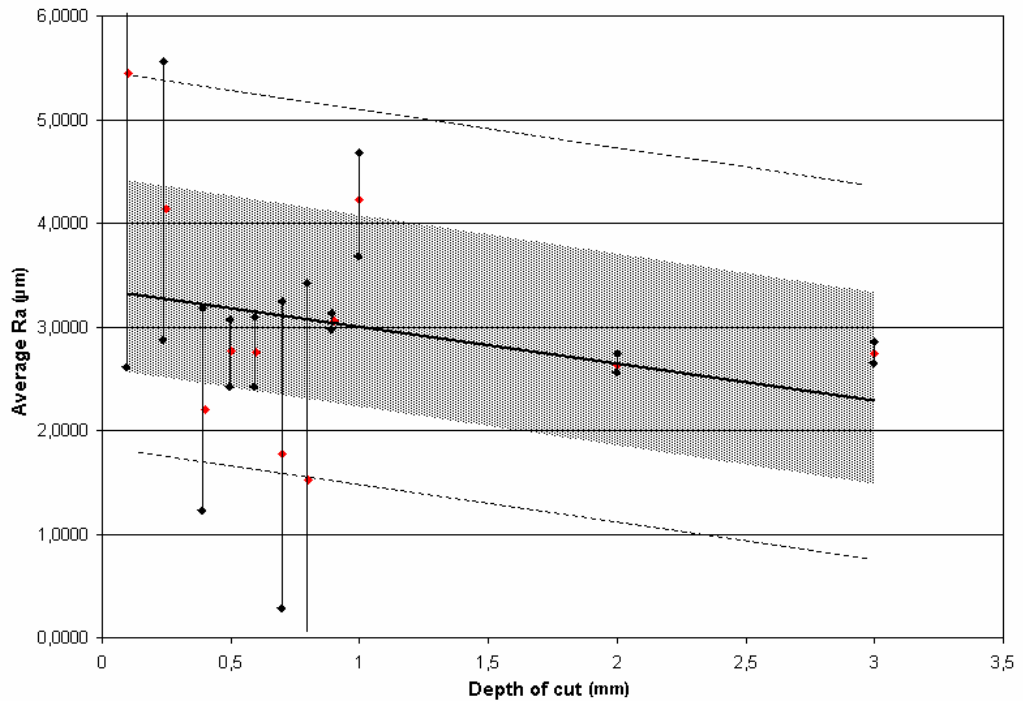


Figura 2. Descrição do parâmetro de rugosidade média  $R_a$  vs. a profundidade de corte.

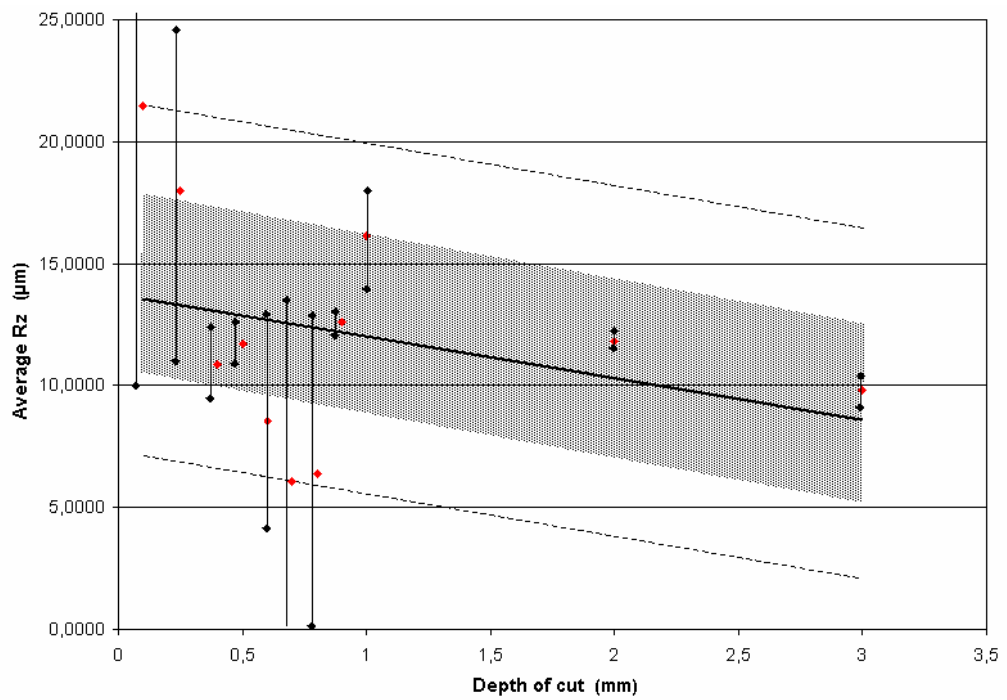


Figura 3. Descrição do parâmetro médio de rugosidade  $R_z$  vs. a profundidade de corte.

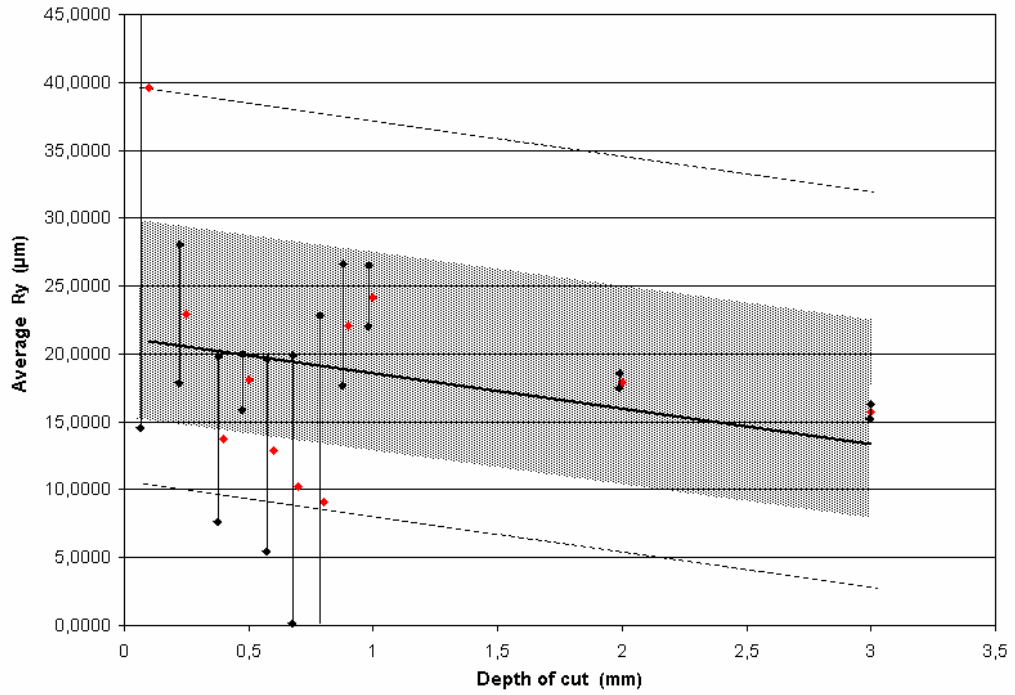


Figura 4. Descrição do parâmetro médio de rugosidade  $R_y$  vs. a profundidade de corte.

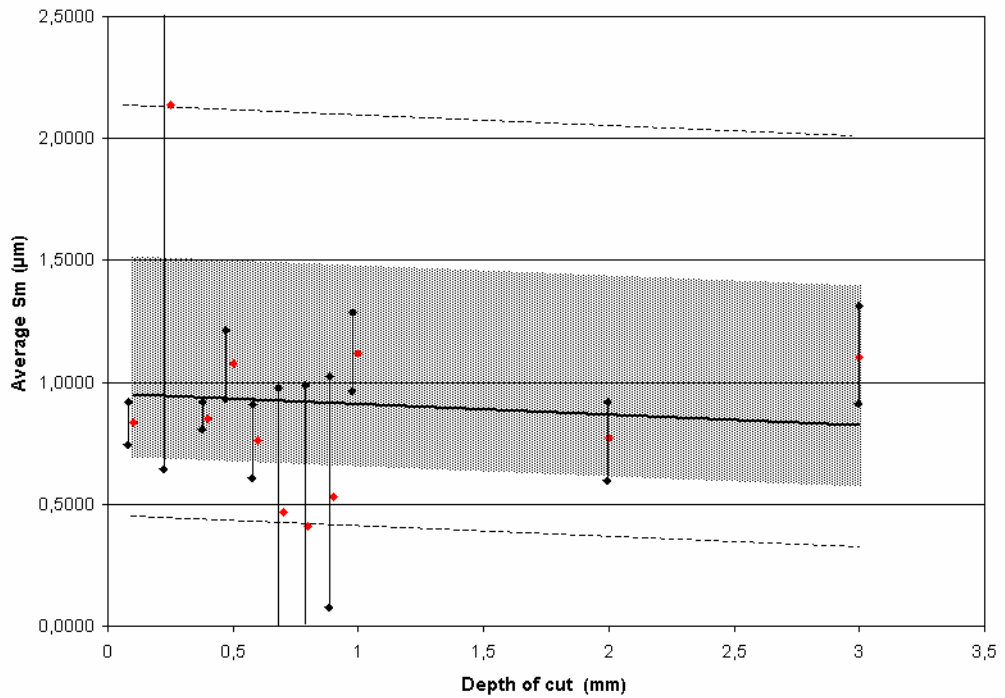


Figura 5. Descrição do parâmetro médio de rugosidade  $S_m$  vs. a profundidade de corte.

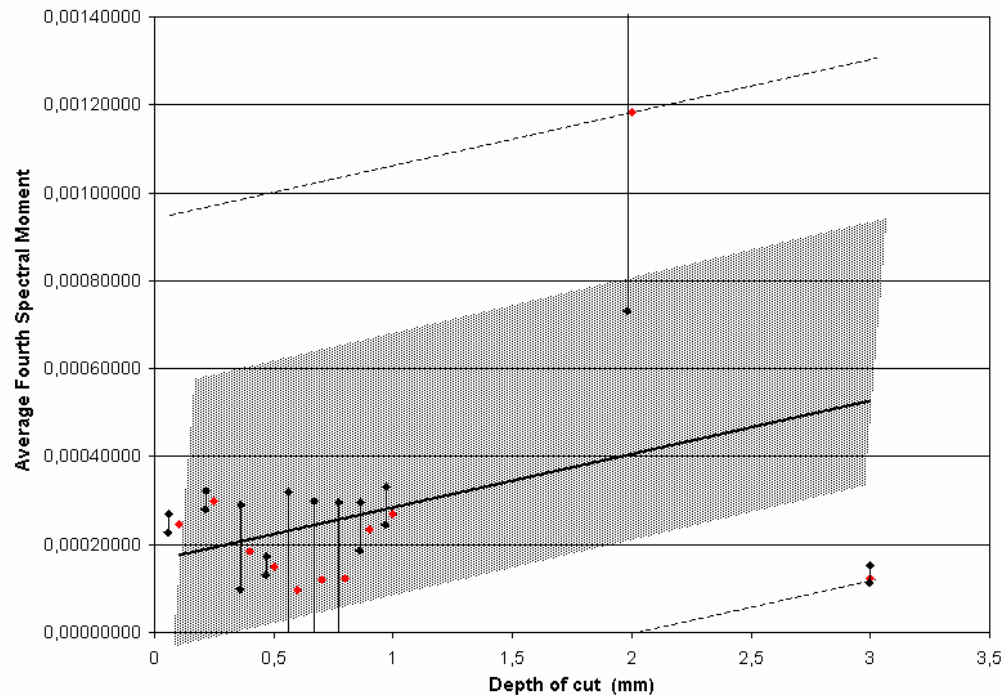


Figura 6. Descrição do momento espectral de quarta ordem ( $m_4$ ) médio versus a profundidade de corte.

Inicialmente, a dispersão entre os valores de rugosidade quando comparados a suas médias é uma ocorrência comum, quando estes são analisados em uma base industrial. As barras verticais indicam o desvio dos valores médios, e como pode ser visto, é um tanto amplo em alguns casos.

Além disso, diversos outros fatores de desvios devem ser considerados, tais como aqueles induzidos por perfilômetros e rugosímetros e também aqueles atribuídos a natureza do processo de usinagem adotado: um corte interrompido através de um fresamento vertical pode contribuir com outra componente para o espectro de rugosidade. Altos valores de avanço, tal como o adotado para os experimentos, pode induzir uma componente de baixa frequência ao espectro, e desta forma aumentar os valores de rugosidade.

Outro efeito possível que deve ser considerado é o cut-off e os níveis de cut-off sugeridos pela norma industrial adotada (DIN 4798). Os algoritmos de cut-off funcionam bem para padrões estatísticos de rugosidades não muito irregulares, com distribuições de frequência mais ou menos iguais para todas as bandas. Portanto, caso estas condições não possam ser completamente asseguradas, o nível de cut-off sugerido pode não ser o ideal, ou até contribuir para ocultar características importantes para o entendimento do fenômeno.

A vibração também deve ser considerada para a dispersão dos resultados. Não aquela causada pelo desbalanceamento da montagem do conjunto do ferramental, mas a vibração produzida pelo corte interrompido. O fresamento de topo neste caso conduz a vibrações de harmônicos proporcionais a rotação do fuso, que são transmitidos à peça (e ao perfil de rugosidade que será medido depois), toda vez que há um impacto de um inserto da ferramenta para remoção do material.

Com relação a rugosidade média ( $R_a$ ) medida, os valores são compatíveis com o esperado na norma de rugosidade DIN 4766. Entretanto, a condição decrescente da rugosidade média com relação ao aumento da profundidade de corte é

ambíguo. Classicamente, o contrário seria esperado, uma vez que um volume maior de material a ser removido (devido ao aumento da profundidade de corte) demandaria maiores esforços de corte.

Estes esforços de corte criariam uma superfície de com uma rugosidade média cada vez mais alta, devido ao fato de que as velocidades de formação do cavaco e de formação da superfície são sempre as mesmas, mas com um volume crescente de material.

Em busca de uma melhor compreensão, quando examinamos a distribuição de valores do parâmetro  $R_z$ , a evidência de altos picos e vales baixos é típica do fresamento de topo em desbaste. Embora os valores de dispersão observados sejam ligeiramente menores do que os observados na rugosidade média, a tendência decrescente relacionada ao aumento da profundidade de corte é igualmente inesperada.

O mesmo é válido para a análise dos valores de  $R_y$ : um maior volume de material a ser removido aparentemente não contribui para o aumento do valor deste parâmetro de rugosidade.

Entretanto, o parâmetro de espaçamento médio entre picos ( $S_m$ ) permaneceu praticamente constante para todas as amostras. A baixa dispersão, junto a uma tendência estável para todas as profundidades de corte observadas, vai ao encontro de uma usinagem que, embora utilize cortes interrompidos, cria padrões de superfície regulares.

Estes resultados são plenamente compatíveis ao esperado, uma vez que não houve variações súbitas para o avanço durante a usinagem. Além disso, estes dados ajudam a comprovar a estabilidade das características iniciais do experimento durante toda sua duração.

Outras contribuições interessantes podem ser obtidas a partir da Figura 5, que faz uma relação entre o momento espectral de quarta ordem ( $m_4$ ) e a profundidade de corte: através deste último parâmetro de corte uma tendência ao crescimento pode ser observada. Isso significa que, conforme a profundidade aumenta em um fresamento de topo com altíssimas velocidades de corte, os picos e vales de seu perfil de rugosidade tendem a aumentar de tamanho, bem como a agudeza de seus topos. Isto é bastante razoável, já que o maior volume de material a ser removido em cada inserto criaria superfícies feitas de uma maneira mais brusca.

Esta condição para formação de superfícies de forma mais rápida é confirmada pela variação do arredondamento dos picos e vales, considerando que o tempo para formações suaves (geralmente formações de caráter elástico) é compatível para pequenas profundidades de corte e são atribuídas a valores menores de momentos espectrais de quarta ordem. O mesmo vale para este tipo de formação relativamente ao tamanho de picos e vales.

Deve ser lembrado que o nível de cut-off tem pouca influência sobre este parâmetro. Como o momento espectral de quarta ordem provém de quatro derivações sucessivas de um sinal, este resultado traz menos variações súbitas (que são filtradas pelo nível de cut-off), exatamente porque estas variações são as mais distantes do perfil derivado.

Resumidamente, com relação aos dados obtidos e analisados, os únicos parâmetros que concordam com o classicamente esperado são o espaçamento médio entre picos ( $S_m$ ) e o momento espectral de quarta ordem ( $m_4$ ). Embora certas críticas possam surgir devido a pouca quantidade de experimentos que assegurem a exclusão ou redução de relevância para os outros parâmetros ( $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_y$ ), uma maior atenção deve ser dispensada para estes parâmetros de comportamento clássico, sempre que se investigue a qualidade superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte.

Relacionado ao processo de usinagem com altíssima velocidade de corte em si, como um segmento de um processo produtivo, certas críticas podem ser feitas.

Por exemplo, a substituição de processos de usinagem convencionais por outros que envolvam usinagens com altíssima velocidade de corte pode ser estudada

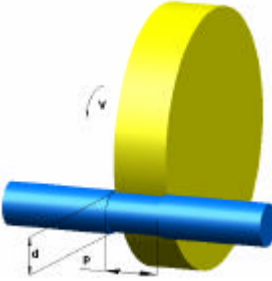
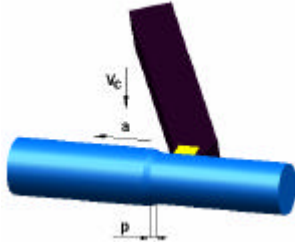
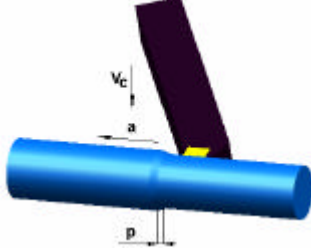


de uma maneira similar a que Tönshoff et al. (2000) propôs para comparação entre retificação cilíndrica e torneamento em duro. Este autor apresenta, como uma base para viabilidade econômica para ambos processos, a taxa de superfície ( $\dot{A}$ ). Utilizando valores típicos para ambos os dois processos, o torneamento em duro é mais flexível e produtivo que a retificação cilíndrica, uma vez que sua taxa de superfície é menor.

Este conceito pode sugerir que retificações cilíndricas seriam mais produtivas economicamente somente quando sua grande taxa de superfície pudesse ser plenamente utilizada (por exemplo, em retificações de barras para grandes lotes ou peças longas).

Utilizando o mesmo conceito, e com os valores válidos para o experimento descrito acima, como uma analogia para torneamento em duro com altíssima velocidade de corte, a Tabela 3 pode ser construída como segue:

Tabela 3. Comparação entre retificação cilíndrica, torneamento em duro e torneamento em duro com altíssima velocidade de corte

|  |    |   |   |
|--|--|--|---|
| Princípio                              | Retificação  | Torneamento em duro  | Torneamento em duro com altíssima velocidade de corte   |
| Taxa de remoção de material            | $Q = a_p \cdot Q'$   | $Q = p \cdot a \cdot V_c$  | $Q = p \cdot a \cdot V_c$   |
| Taxa de remoção de material específica | $Q' = d \cdot \omega \cdot V_a$  | $Q' = p \cdot a \cdot V_c / l_c$   | $Q' = p \cdot a \cdot V_c / l_c$  |
| Taxa de superfície                     | $\dot{A} = p \cdot V_a$  | $\dot{A} = a \cdot V_c$  | $\dot{A} = a \cdot V_c$   |
| Parâmetros característicos             | $p = 5 - 20 \text{ mm}$<br>$V_a = 1 \text{ m/s}$   | $p = 0,05 - 0,3 \text{ mm}$<br>$a = 0,05 - 0,2 \text{ mm}$<br>$V_c = 150 \text{ m/min}$  | $p = 0,05 - 0,3 \text{ mm}$<br>$a = 0,05 - 0,2 \text{ mm}$<br>$V_c = 1000 \text{ m/min}$  |
| Valores típicos                        | $Q' = 2 - 12 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$<br>$Q = 10 - 240 \text{ mm}^3/\text{s}$<br>$\dot{A} = 5000 - 20000 \text{ mm}^2/\text{s}$ | $Q' = 22 - 242 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$<br>$Q = 6 - 150 \text{ mm}^3/\text{s}$<br>$\dot{A} = 125 - 500 \text{ mm}^2/\text{s}$ | $Q' = 154 - 1694 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$<br>$Q = 42 - 1000 \text{ mm}^3/\text{s}$<br>$\dot{A} = 833 - 3333 \text{ mm}^2/\text{s}$ |

Conforme pode ser visto acima, utilizando parâmetros industriais comuns, tais como a velocidade de corte ( $V_c$ ) e o avanço ( $a$ ), há uma vantagem ainda maior quando se substitui a retificação cilíndrica por torneamento em duro com altíssima velocidade de corte. A gama de valores típicos para sua taxa de superfície alcança o mínimo típico para torneamento em duro (portanto assegurando flexibilidade e produtividade ao menos equivalentes) bem como valores máximos próximos ao típico para retificação cilíndrica, permitindo uma concorrência para operações de lotes maiores ou peças mais longas.

Esta Tabela é bastante interessante, todavia somente para estudos econômicos específicos. Uma melhor compreensão do processo pode ser inferida ao analisar outros fatores, tais como custos de aquisição de maquinário, custos de ferramental e outros. A Tabela seguinte ilustra isso:

Tabela 4. Comparação entre retificação cilíndrica, torneamento em duro e torneamento em duro com altíssima velocidade de corte para aspectos globais

|                     |                            | Torneamento em duro | Retificação cilíndrica | Altíssima $V_c$ |
|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|-----------------|
| Aspectos econômicos | Tempo de processamento     | 😊/😞*                | 😊/😞*                   | 😊               |
|                     | Taxa de remoção            | 😊                   | 😞                      | 😊/😞             |
|                     | Custos de aquisição        | 😞/😊**               | 😞/😞**                  | 😞               |
|                     | Custos de ferramental      | 😞                   | 😊                      | 😞               |
| Flexibilidade       | Usinagem multi-face        | 😊                   | 😞                      | 😊               |
|                     | Usinagem de perfis         | 😊                   | 😞/😊                    | 😊               |
| Aspectos ecológicos | Consumo de energia         | 😊                   | 😞                      | 😞               |
|                     | Fluido de corte            | 😊                   | 😞                      | 😊               |
|                     | Reciclagem de cavaco       | 😊                   | 😞                      | 😊               |
| Qualidade           | Qualidade da peça acabada  | ?                   | 😊                      | 😊 / ?           |
|                     | Confiabilidade do processo | ?                   | 😊                      | 😊 / ?           |
|                     | Integridade da superfície  | ?                   | 😊                      | 😊 / ?           |

😊 : Avaliação positiva 😊 : Avaliação neutra 😞 : Avaliação negativa ? : Indeterminado

Observações:

\* Dependendo da aplicação, uma taxa de 1:10 até 10:1 é possível

\*\* Máquinas especiais ou centros de retificação são freqüentemente necessários

As seguintes considerações podem ser feitas à Tabela 4: embora o tempo de processamento seja sempre menor, a taxa de remoção pode ser menor, aumentando a característica de flexibilidade, ou maior, melhorando sua capacidade de para grandes lotes. Certamente os custos para aquisição de maquinário e ferramental são os maiores obstáculos hoje presentes.

A usinagem multi-face e de perfis são vantagens óbvias para os processos com altíssima velocidade de corte sobre a retificação, contanto que o consumo de energia não previna esta aplicação. Uma vez que a maioria dos processos com altíssima velocidade de corte não demanda fluidos refrigerantes, uma central de filtragem pode ser descartada, assim como a reciclagem dos cavacos pode ser melhorada.

Em relação a qualidade, há alguma controvérsia no assunto, uma vez que o resultado final é diretamente dependente do desempenho da ferramenta durante o corte. Rebolos podem ter uma vantagem, mas não sempre, devido a sua natureza auto-afiante.

### **3. CONCLUSÕES**

Para os experimentos estudados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

A) A investigação sobre a qualidade de superfícies usinadas com altíssima velocidade de corte através do fresamento de topo, utilizando diversos parâmetros de rugosidade, pôde indicar que em diversas ocasiões o aumento clássico do parâmetro em relação ao aumento da profundidade de corte não ocorreu.

B) Com relação a dispersão entre os parâmetros de rugosidade, pode ser sugerido que, para os parâmetros aqui revisados, os que melhor se adequaram a necessidade do processo de fabricação são a distância média entre picos ( $S_m$ ) e o momento espectral de quarta ordem ( $m_4$ ).

E para o material revisado, as seguintes conclusões puderam ser feitas:

C) Os processos de usinagem com altíssima velocidade de corte são, de uma maneira geral, mais produtivos e flexíveis, quando comparados a processos de usinagem convencional. Esta evidência é ainda maior quando os custos de maquinário e ferramental não são considerados.

D) Novas possibilidades para seqüências de manufatura são possíveis, e um exemplo imediato para esta operação é o torneamento com altíssima velocidade de corte de peças curtas, tais como virabrequins, juntas homocinéticas e pontas de eixo.

### **4. REFERÊNCIAS**

- Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., 1997, "A review of ultra high speed milling of hardened steels", Journal of Materials Processing Technology n. 69, p. 1 -17
- König, W. et al., 1987, "Alternative Processes For Cost Reduction", Annals of the CIRP, Vol. 36/2, p. 443 - 444
- McCool, J. I., 1988, "The Distribution of Microcontact Area, Load, Pressure and Flash Temperature Under the Greenwood-Williamson Model", Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol. 110
- Poulachon, G., Moisan, A., 1998, "Contribution to the study of the cutting mechanisms during high speed machining of hardened steel", CIRP Annals of Manufacturing Technology 47
- Tönshoff, H. K., Amor, R. B. and Andrae, P., 1999, "Chip formation in high speed cutting (HSC)", Society of Manufacturing Engineers 253, p. 1-12
- Tönshoff, H. K. et al., 2000, "Cutting of Hardened Steel", Annals of the CIRP, Vol. 49/2, p. 547 - 566