



## METODOLOGIA PARA A COMPARAÇÃO ENTRE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA E O TORNEAMENTO NA FABRICAÇÃO DE EIXOS

**João C. Soares Filho<sup>1</sup>, João F.G. de Oliveira<sup>2</sup>**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos  
Núcleo de Manufatura Avançada-NUMA

(1) [jcsoares@sc.usp.br](mailto:jcsoares@sc.usp.br), (2) [jfgo@sc.usp.br](mailto:jfgo@sc.usp.br)

**Resumo.** Diversos fatores competitivos levaram as indústrias a desenvolverem novos materiais de ferramentas, tais como CBN e cerâmica, que são capazes de usinar aços endurecidos até 65 HRc. Graças a isto, dois dos mais importantes processos de fabricação, que são a retificação e o torneamento, concorrem hoje nas mesmas aplicações. Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência do sobremetal para a determinação do processo ideal de usinagem (torneamento ou retificação), tendo em vista o mínimo custo e a máxima produção, considerando-se para isto aspectos como geometria da peça, qualidade, potência disponível da máquina e valor do sobremetal, procurando assim auxiliar aos engenheiros de processos numa tomada de decisão para a escolha do melhor processo.

**Palavras-chave :** Retificação, torneamento, sobremetal

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente ferramentas de CBN, cerâmica e CERMETS aliadas a equipamentos mais rígidos permitem a usinagem de aços endurecidos de até 65 HRc, o que há algum tempo só era possível de se obter através da retificação. Desta forma tem-se hoje, em determinadas aplicações, uma competição entre dois dos mais importantes processos de fabricação, que são a retificação e o torneamento. Este trabalho compara a retificação cilíndrica e o torneamento na fabricação de eixos, neste caso um aço SAE 4340 – temperado (51 HRc), material largamente utilizado pela indústria em componentes altamente solicitados como eixos, válvulas de motores etc. A pesquisa limita-se ao estudo do sobremetal a ser removido e sua influência na determinação de qual é o processo a ser adotado, considerando-se para isto os parâmetros relacionados com a qualidade final do produto, quais sejam: acabamento superficial, dureza e geometria da peça.

### 2. METODOLOGIA COMPARATIVA PARA A ESCOLHA ENTRE OS PROCESSOS DE TORNEAMENTO E RETIFICAÇÃO

Partindo-se do pressuposto de que determinada especificação de qualidade seja atendida pelos dois processos, dois pontos básicos para esta tomada de decisão são capacidade de produção e custos. Neste trabalho será estudada a comparação entre torneamento e retificação dentro do contexto de fabricação de eixos de transmissão de veículos. A usinagem dos colos destes componentes normalmente atingem qualidade IT7 / IT8, que são atingíveis pelos dois processos. Atualmente existem diversas iniciativas para substituir a retificação pelo torneamento de materiais endurecidos com CBN. A viabilidade desta substituição é o foco do presente estudo.

## 2.1 Torneamento

Para os estudos em questão, serão considerados apenas os tempos de corte ( $t_c$ ), de aproximação e de afastamento ( $t_a$ ) e de troca das peças ( $t_s$ ) envolvidos nos dois processos. A fim de estabelecer-se uma metodologia comparativa entre estes, considerar-se-á que as peças são possíveis de serem executadas por ambos os processos na faixa de qualidade considerada – IT8.

Segundo Soares (1999), o tempo total de torneamento simplificado para comparação com a retificação é dado pela eq.1 a seguir:

$$t_t = \frac{l_f * P * d}{1000 * f * v_c} + t_a + t_s \quad [\text{min}] \quad (1)$$

onde :  $l_f$  é o comprimento de avanço;  $d$  é o diâmetro da peça,  $f$  é o avanço e  $v$  é a velocidade de corte. No presente trabalho o valor de  $l_f$  será associado ao valor da largura de retificação  $b_w$  para efeito de comparação

Portanto o tempo de torneamento depende basicamente do comprimento, do avanço e da velocidade de corte adotados.

## 2.2 Retificação

Considera-se neste estudo a operação de retificação em mergulho, que utiliza toda a superfície de trabalho do rebolo. Conforme mencionado no item 2.1 acima, serão considerados somente os tempos de corte ( $t_c$ ), de aproximação e de afastamento ( $t_a$ ) e de colocação e retirada das peças ( $t_s$ ).

Desta forma podemos escrever o tempo parcial de retificação  $t_R$  como sendo:

$$t_R = t_c + t_a + t_s \quad (2)$$

Como a retificação em mergulho envolve toda a superfície de trabalho do rebolo, é preciso analisar-se o tempo de retificação em função da largura da peça, conforme verifica-se a seguir:

***Comprimento de corte da peça é igual ou menor à largura efetiva de corte do rebolo.***

$$b_w \leq b_{se} \Rightarrow \text{AproxIN} [b_w/b_{se}] = 1$$

Onde  $\text{AproxIN} [b_w/b_{se}]$  = aproximação do próximo inteiro,  $b_w$  é o comprimento de corte e  $b_{se}$  é a largura de corte efetiva do rebolo.

Na retificação em mergulho o tempo de corte  $t_c$  é dado por :  $t_c = t_{\text{merg}} + t_{\text{so}}$  [min]

Portanto pode-se calcular o tempo parcial de retificação  $t_R$  pela seguinte equação (Soares,1999):

$$t_R = \frac{(d_i - d_f)}{v_f} + t_a + t_s + t_{so} \quad [\text{min}] \quad (3)$$

Onde :  $t_{so}$  é o tempo de “sparkout” ou centelhamento, sem remoção de material [min.],  $d_i$  é o diâmetro inicial da peça [mm]( valor programado para abranger uma margem de segurança acima do diâmetro máximo do lote),  $d_f$  é o diâmetro final da peça [mm],  $F$  é a velocidade de avanço do rebolo no diâmetro [mm/min] e  $t_{\text{merg}}$  é o tempo de mergulho[ $\text{min}$ ]

***Comprimento de corte da peça é maior que a largura efetiva de corte do rebolo.***

$$bw > bse \Rightarrow \text{AproxIN} [bw/bse] > 1$$

Onde  $\text{AproxIN} [bw/bse] > 1$  = aproximação do próximo inteiro maior que 1, que corresponde ao número de vezes que o rebolo penetrará na peça

Neste caso tem-se uma condição diferente, pois o rebolo entrará no material mais do que uma vez. Portanto, deve-se considerar o tempo  $t_a$  (tempo de aproximação e de afastamento) , o tempo de reposicionamento do rebolo  $t_{\text{rep}}$  e o tempo de sparkout dentro do tempo de corte.

Desta forma, tem-se para este caso :

$$t_R = \left\{ \left[ t_a + t_{so} + t_{\text{rep}} + \frac{(d_i - d_f)}{v_f} \right] * \text{AproxIN} \left[ \frac{b_w}{b_{se}} \right] \right\} + t_s \quad [\text{min}] \quad (4)$$

$$t_{\text{rep}} = \frac{b_{se}}{v_{fb}} \quad [\text{min}] \quad \text{e} \quad (5)$$

$$t_a = \frac{d_{ap}}{v_{fap}} + \frac{d_{af}}{v_{faf}} \quad [\text{min}] \quad (6)$$

Onde:

$v_{fb}$  = velocidade de reposicionamento do rebolo [mm/min],  $d_{ap}$  = distância de aproximação rebolo/peça [mm],  $v_{fap}$  = velocidade de aproximação do rebolo [mm/min],  $d_{af}$  = distância de afastamento do rebolo/peça [mm],  $v_{faf}$  = velocidade de afastamento do rebolo [mm/min].

A figura 1 a seguir apresenta esquematicamente o corte para  $bw > bse$ .

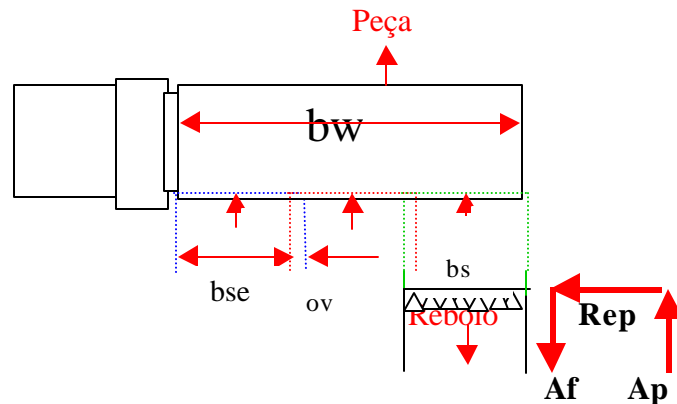


Figura 1 – apresentação esquemática do corte na retificação em mergulho para  $bw > bse$

### 2.3 Determinação do sobremetal limite para a escolha do menor tempo de corte entre a retificação e o torneamento.

Para a determinação do sobremetal limite deve-se igualar o tempo de retificação através da equação (7) (para  $\text{AproxIN}[b_w/b_{se}] \leq 1$ ) ou da equação (8) (para  $\text{AproxIN}[b_w/b_{se}] > 1$ ) com o tempo de corte do torneamento obtido através da equação (3). Como o tempo de corte no torneamento independe do valor do sobremetal ( $S_m$ ) e o tempo de retificação é diretamente proporcional ao valor do sobremetal ( $S_m$ ), valores de sobremetal maiores que o sobremetal limite ( $S_m > S_{mlim}$ ) implicam em tempo de retificação maior que o tempo de torneamento.

Segundo Soares (1999), supondo-se que os tempos  $t_a$  e  $t_s$  para o torneamento e retificação são praticamente os mesmos tem-se:

a) Para  $b_w/b_{se} \leq 1$  tem-se:

$$S_{mlim} = v_f \left( \frac{b_w * P * d}{1000 * f * v_c} - t_{so} \right) \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

Onde  $S_{mlim}$  = sobremetal limite

b) Para  $b_w/b_{se} > 1$  tem-se:

$$S_{mlim} = v_f \left[ \frac{1}{\text{AproxIN}[b_w/b_{se}]} * \left( \left( \frac{b_w * P * d}{1000 * f * v_c} \right) + t_a \right) - (t_a + t_{so} + t_{rep}) \right] \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

### 2.4 Comparação entre os custos de ferramental por peça na retificação e no torneamento.

#### *Custo de ferramenta por peça na retificação.*

$$K_{ufr} = \frac{(K_r + K_{dr})}{Z} \quad [\text{R\$}] \quad (9)$$

$$Z = n_{dr} * PPd \quad (10)$$

$$n_{dr} = \frac{(d_{ir} - d_{fr})}{a_{dt}} \quad (11)$$

Onde:  $K_{ufr}$  é custo de ferramental por peça para a retificação,  $K_r$  é custo de aquisição do rebolo e  $K_{dr}$  é o custo do dressador por rebolo,  $Z$  é o lote total de peças produzidas,  $d_{ir}$  é o diâmetro inicial do rebolo [mm],  $d_{fr}$  é o diâmetro final do rebolo [mm],  $a_{dt}$  é a profundidade de dressagem total [mm] e  $PPd$  é o número de peças por dressagem.

#### *Custo de ferramenta por peça no torneamento.*

Segundo Ferraresi (1969), o custo por peça para o torneamento pode ser calculado conforme equações a seguir:

$$K_{uf} = \frac{1}{Zt} * K_{ft} \quad [\text{R\$}] \quad (12)$$

$$K_{ft} = \frac{1}{n_f t} * V_{si} + \frac{K_s}{n_s} \quad [\text{R\$}] \quad (13)$$

Onde:  $K_{uf}$  é o custo de ferramenta para o torneamento,  $K_{ft}$  é o custo da ferramenta por vida T,  $Z_t$  = número de peças usinadas por vida T da ferramenta,  $n_{ft}$  é a vida média do porta ferramentas em quantidade de fios de corte (adotamos 1000),  $V_{si}$  é o custo de aquisição do porta ferramentas,  $K_s$  é o custo de aquisição do inserto e  $n_s$  é o número de fios de corte do inserto.

A comparação deve ser feita pelo cálculo de  $K_{uf}$  e  $k_{ufr}$ , a partir da determinação experimental dos valores de PPD,  $Z_t$  e  $n_{ft}$ .

## 2. EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Adotou-se para o controle dimensional das amostras a qualidade IT8 e os parâmetros de fim de vida considerados foram: a variação dimensional, a rugosidade superficial Ra-CLA (“center Line Average”) e a circularidade. Os equipamentos utilizados foram : retífica cilíndrica CNC “ZEMA ZSELICS G800 e um torno CNC INDEX GU 600, com comando Siemens 810D.

As dimensões do corpo de prova são  $\phi = 54$  mm e largura de 35 mm e as condições de usinagem utilizadas são apresentadas nas tabelas 1 e 2, conforme segue:

Tabela 1. Condições de usinagem utilizadas no torneamento do aço SAE 4340-(51 Hrc)

	Veloc.corte $V_c$ [m/min]	Avanço f [mm/volta]	Prof.usinagem $a_p$ [mm]	Compr.corte $b_w$ [mm]
Condição 1	180	0.08	0.5	35
Condição 2	150	0.08	0.5	35
Condição 3	180	0.08	0.25	35
Condição 4	150	0.08	0.25	35
Condição 5	200	0.08	0.1	35
Condição 6	500	0.08	0.1	35

Tabela 2. Condições de usinagem utilizadas na retificação do aço SAE 4340-(51 HRc)

Dureza do rebolo	Avanço do rebolo F (mm/min)	Sobremetal Usinado no diâmetro (mm)	Ud	Tempo de sparkout (s)	Rotação Da Peça (rpm)	Rotação do rebolo (rpm)	Peças por ensaio
R	0.5	0.5	5	10	70	1750	50
G	0.5	0.5	5	4	70	1750	34

A comparação entre os resultados obtidos no torneamento e na retificação dos corpos de prova conforme condições mostradas na tabela 1 e com qualidade IT8 para peças com diâmetro entre 50 e 80 mm – variação dimensional limite de 46  $\mu\text{m}$ - (Agostinho et al, 1989) são mostrados na figura 2, a seguir:

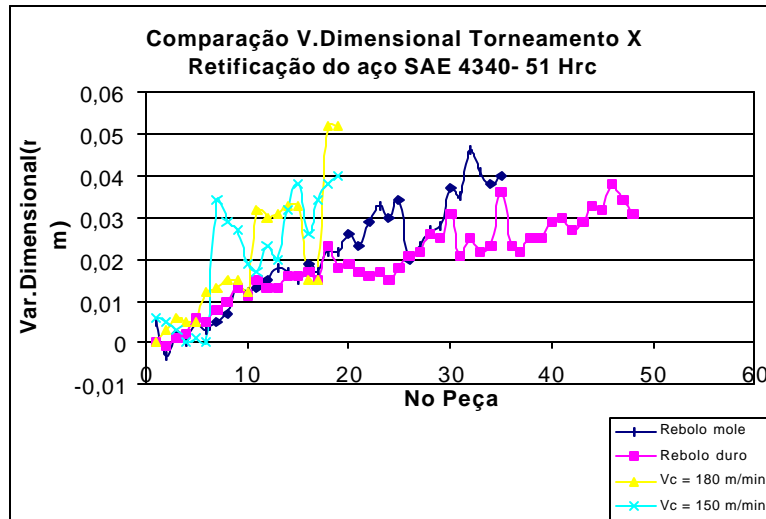


Figura 2. Comparação entre as variações dimensionais obtidas na retificação e no torneamento do aço SAE 4340 – 51 Hrc, com sobremetal usinado de 0.5 mm no diâmetro.

Observa-se no gráfico da fig.2 que a retificação apresenta maior estabilidade na variação dimensional que o torneamento, sendo que o melhor resultado é obtido com o rebolo duro. No torneamento houve uma tendência na variação dimensional para as diversas condições utilizadas, com uma vida média de 20 peças por aresta para o inserto utilizado (PCBN-“Tipped” SNGN 12 04 08-SANDVIK, exceto na condição 6, utilizada com o intuito de conhecer-se o comportamento da ferramenta em condições extremas, pois segundo König (1993) não é recomendada a utilização de insertos soldados (“tipped”) a velocidades de corte acima de 220 m/min. Entretanto, o inserto de PCBN comportou-se bem apesar do desgaste acelerado e da vibração excessiva.

A figura 3 apresenta uma comparação entre os valores de rugosidade Ra obtidas no torneamento e na retificação do aço SAE 4340 – endurecido (51 Hrc) para um sobremetal usinado de 0,5 mm no diâmetro.

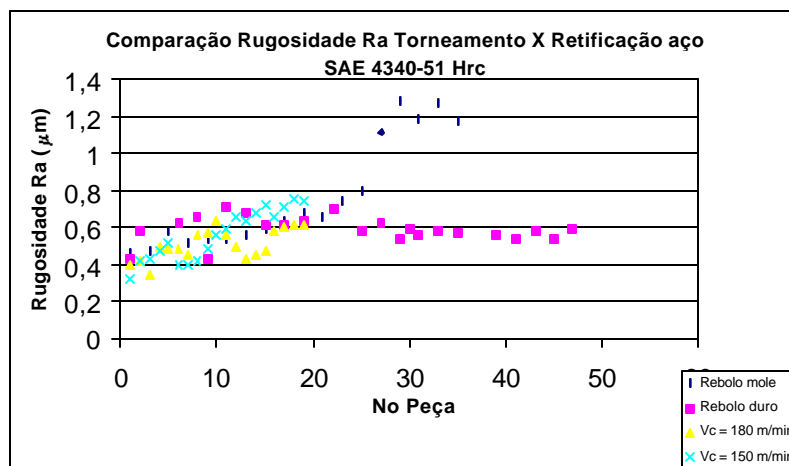


Figura 3. gráfico comparativo entre as rugosidades obtidas na retificação e no torneamento do aço sae 4340 – 51 hrc

Do gráfico observa-se que os valores de rugosidade Ra obtidos no torneamento e na retificação com o rebolo duro mantém-se num mesmo patamar, abaixo do limite estabelecido para as dimensões usinadas - 1,2µm (Agostinho et al, 1988). Já na retificação com o rebolo mole ocorre um salto nos valores de Ra a partir da peça de número 25, ultrapassando o limite de 1,2µm

já na trigésima peça. Este fato indica que a rugosidade Ra é um fator mais crítico para indicar o fim de vida do rebolo mole, que produziu 32 peças sob o critério dimensional.

A figura 4 apresenta as fotos da aresta do inserto utilizada nos ensaios da condição 1.

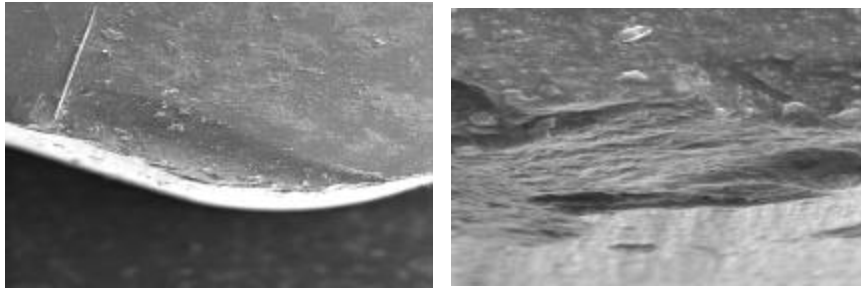


Figura 4. Foto da aresta do inserto utilizada para a usinagem do aço SAE 4340 (51 HRc) na condição 1 ( $v_c = 180$  m/min) mostrando um desgaste por cratera e ampliação mostrando o desgaste de flanco, com deterioração do material PCBN.

É possível comparar-se os dois processos quanto ao tempo de produção, igualando-se as eq.1 (torneamento) com a eq.3 (retificação-  $b_w \leq b_{se}$ ) e com a eq.4 (retificação-  $b_w > b_{se}$ ). No caso apresentado na fig.5 adotou-se a cond.1 do torneamento com velocidade de avanço  $v_f=0,5$  mm/min e  $t_{s0}=0,07$  min para a retificação e  $t_a+t_s=0,15$  min e  $b_w=35$  mm para os dois processos. Na fig.6 verifica-se a influência da largura de corte no tempo, adotando-se pois um sobremetal fixo de 0,1 mm e variando-se a largura de corte, com as demais condições idênticas às citadas anteriormente.

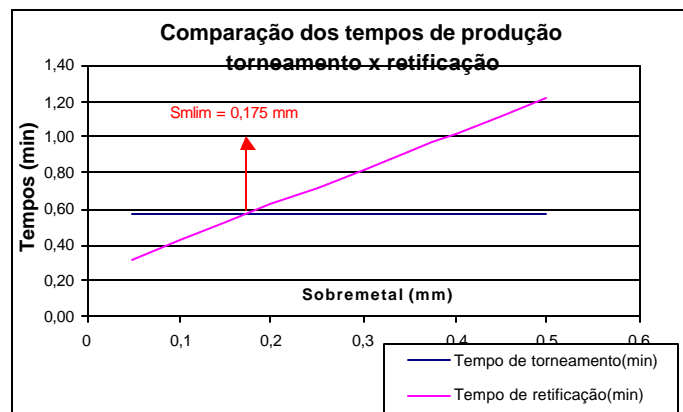


Figura 5. Comparação entre os tempos de torneamento e de retificação na usinagem do aço SAE 4340 (51 HRc) e verificação do sobremetal limite.

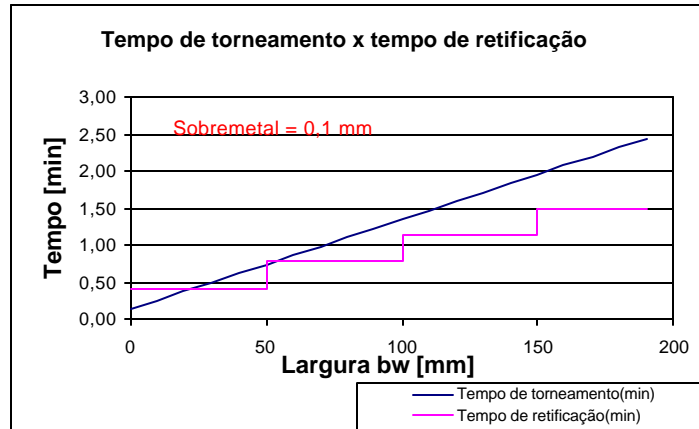


Figura 6. Tempo de torneamento x tempo de retificação para um sobremetal fixo ( $s_m=0.1\text{mm}$ ) e variação na largura de usinagem  $b_w$ .

Utilizando-se a equação 7, encontra-se o valor do sobremetal limite igual a 0.175 mm para as condições adotadas, valor este igual ao encontrado graficamente na figura 5. Como pode-se verificar na figura 5, valores de sobremetal maiores que o sobremetal limite ( $S_m > S_{m\text{lim}}$ ) implicam em tempos de retificação maiores que os tempos de torneamento.

Na fig.6 observa-se o aumento do tempo de torneamento proporcional ao aumento da largura de corte  $b_w$ . Na retificação os tempos são constantes para  $b_w \leq b_{se}$  e mudam de patamar para  $b_w > b_{se}$ . O tempo de torneamento tende a zero para pequenos valores de  $b_w$ , sendo portanto mais vantajoso que a retificação neste caso. Já para pequenos valores de sobremetal a retificação é bastante competitiva.

Outro fator importante a ser considerado é o custo de ferramenta por peça. Sendo a faixa de vida útil do rebolo igual a 100 mm, profundidade de dressagem  $a_{dt} = 0,04$  mm, obtém-se 2500 dressagens por vida do rebolo. Considerando-se uma quantidade de 30 peças por dressagem, obtém-se um total de 75.000 peças/rebolo. Se considerarmos um custo médio de R\$ 300,00 para rebolo e dressador, teremos um custo  $K_{ufr} = \text{R\$ } 0,004/\text{peça}$ . Substituindo-se este valor por  $K_{uf}$  – eq.12, encontra-se uma vida  $Z_t = 5.050$  peças/inserto, ou seja, 632 peças/aresta de corte, valor que está muito abaixo do valor encontrado (20 peças/aresta).

### 3. CONCLUSÕES

- O torneamento compete hoje com a retificação na usinagem de aços endurecidos, podendo toronar peças com qualidade IT8, utilizando-se tornos modernos equipados com controladores numéricos computadorizados (CNC) de última geração e ferramentas de nitreto de boro cúbico (CBN);
- O processo de retificação é mais estável que o de torneamento, sendo portanto mais seguro para a obtenção de tolerâncias muito apertadas (abaixo de IT7) e mais adequado para automação;
- O torneamento é mais competitivo para usinar peças com pequeno comprimento de corte ou com sobremetal elevado. A retificação é melhor para pequenos valores de sobremetal;
- A retificação tem menor custo de ferramenta/peça, sendo portanto melhor indicada para a produção de grandes lotes de peças;



- O torneamento é um processo que pode ser executado a seco, produzindo cavacos limpos e recicláveis, sem agredir o meio ambiente, sendo portanto ecológicamente mais favorável;

## REFERÊNCIAS

- Agostinho, O.L.;Rodrigues,A.C.S.; Lirani,J. 1988. Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões. 4.ed. São Paulo, Edgard Blücher.
- Ferraresi, D.1969. Determinação das condições econômicas de usinagem. In: Fundamentos da usinagem dos metais, 9ª, São Paulo.1977, cap.XIII, p. 646-736. Edgard Blücher.
- König, W.; Berktold, A. 1993. Turning versus grinding – a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies. *CIRP's Annals*, v.42, p. 39-43, Jan.
- Soares F.,J.C.1999.Metodologia para a comparação entre retificação cilíndrica e o torneamento na fabricação de eixos. São Carlos. 91 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

*Abstract. Several facts have pressed the cutting tools manufacturers to develop new materials, as CBN and ceramics, already available for hard machining steel with hardness levels up to 65 HRc. Therefore, two of the most important machining processes, that are grinding and turning, compete today in the same applications. The goal of this work is to present a study showing the influences of the stock removal, in order to decide which one is the best process between grinding and turning, searching the minimum cost and maximum production. To reach this goal, some aspects were considered such as workpiece geometry, machine power and stock removal, trying to help process engineers to choose the best process.*

*Keywords : Grinding, turning, stock removal*