

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Eng. João Chagas Soares Filho

DEDALUS - Acervo - EESC



31100006863



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tit. João Fernando G. de Oliveira

São Carlos, Fevereiro de 1999

Class.	TESE - EESC
Ord.	5703
Tombo	0069/99

311 00006863

S/S 1030590

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S676m

Soares Filho, João Chagas
Metodologia para a comparação entre retificação
cilíndrica e o torneamento na fabricação de eixos /
João Chagas Soares Filho. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

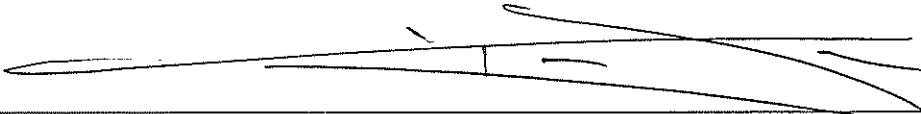
Orientador: Prof. Dr. João Fernando G. de Oliveira.

1. Retificação. 2. Torneamento. 3. Sobremetal.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **JOÃO CHAGAS SOARES FILHO**

Dissertação defendida e aprovada em 15.03.1999
pela Comissão Julgadora:




Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



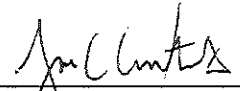
Prof. Doutor **JAIME GILBERTO DUDUCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **ANSELMO EDUARDO DINIZ**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*À minha esposa Kleo e
meus filhos Felipe,
Henrique e Juliana, aos
meus pais, João e
Antonia e a todos meus
irmãos*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela família e pelos amigos;

Ao Professor Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela orientação fornecida durante o desenvolvimento deste trabalho, pela confiança e, acima de tudo, pela amizade;

Ao Professor Dr Reginaldo Teixeira Coelho pela ajuda na elaboração deste trabalho e pela amizade;

À CAPES pela bolsa de estudo concedida;

À minha esposa Kleo e filhos Felipe, Henrique e Juliana pelo incentivo, pelo amor e carinho e pela compreensão diante das ausências e das dificuldades;

Aos meus pais , irmãos e sobrinhos, pelos valores morais e espirituais que levarei por toda a minha vida e pela ajuda e apoio nos momentos de dificuldades;

À dona Maria Amália, ao seu Mário e ao Cesar, pela acolhida e pela amizade;

Aos amigos do Grupo de Otimização de Processos de Fabricação: Aldo, Carlos, João Jorge, Juarez, Nelson e Ronaldo e aos amigos da sala de bolsistas Amauri e Zilda pela amizade e apoio;

Às amigas Lea e Renata, pelo incentivo, pela ajuda e pela amizade;

Ao Serviço de Biblioteca da EESC-USP e à Biblioteca da Física, pelos recursos oferecidos;

Aos técnicos do LAMAFE, pela atenção e ajuda;

Às secretárias da pós-graduação Ana Paula e Elizabete e aos demais funcionários da secretaria da Engenharia Mecânica pela atenção;

A todos que contribuíram para a minha evolução acadêmica , social e espiritual.

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
1.1 - OBJETIVO	2
1.2 – ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - TENDENCIAS	4
2.1.1 - NOVOS MATERIAIS	4
2.1.2 - MUDANÇAS NA MANUFATURA.....	5
2.1.3 - USINAGEM A ALTA VELOCIDADE.....	5
2.1.4 - NEAR-NET-SHAPE -.....	7
2.1.5 - USINAGEM A SECO.....	8
2.1.6 - EVOLUÇÃO DA RETIFICAÇÃO.....	10
2.1.7 - TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS (“HARD TURNING”).....	14
2.2 - TORNEAMENTO	16
2.2.1 - Equipamentos.....	17
2.2.2 – Ferramentas para usinagem de materiais endurecidos.....	19
2.2.2.1 - Modos de desgaste da ferramenta	21
2.2.2.2 - Coberturas de Carbetos	22
2.2.2.3 - Insetos Cerâmicos.....	23
2.2.2.4 - O PCBN ampliando os limites da usinagem	24
2.2.2.4.1 - Geometria da ferramenta de PCBN.....	27
2.2.2.4.2 - Influência do tratamento térmico no desgaste da ferramenta.....	28
2.2.2.4.3 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta de PCBN.....	29
2.2.3 - Mudanças estruturais na superfície da peça.....	30
2.3 - RETIFICAÇÃO.....	31
2.3.1 - Retificação a alta velocidade	32
2.3.2 - A Refrigeração na Retificação	35
2.3.3 - Sistemas de monitoramento na retificação.....	35
2.3.3.1 - Sistema de Calibração Automática do Rebolo	36
2.3.3.2 - Dressagem Inteligente.....	37
2.3.3.3 - Gap Less Rebolo/ Peça	38
2.3.3.4 - Sistema anti-colisão	38
2.3.3.5 - Detecção de falhas no sobremetal.....	39
2.3.4 - Retificação com Alta Profundidade de Corte - “Creep Feed”	39
2.3.4.1 - Retificação com direção de corte Concordante/Discordante.....	40
2.3.4.2 - Refrigeração em Creep Feed	40
2.3.4.3 - Rebolos para retificação creep feed	41
2.3.4.4 - Dressagem contínua.....	41

2.3.4.5 - Equipamentos para retificação creep feed	42
2.3.5 <i>Integridade superficial da peça devido ao abrasivo</i>	42
2.4 -TORNEAMENTO X RETIFICAÇÃO.....	44
2.4.1 - <i>Mudanças nas propriedades Físicas das superfícies das Peças</i>	45
2.4.2 - <i>Nível de Precisão Alcançável no Torneamento e na Retificação</i>	47
2.4.3 – <i>Capacidade de Remoção de Material</i>	49
2.4.4 – <i>Custo de Produção</i>	49
2.4.5 – <i>Resíduos</i>	50
2.4.6 – <i>Estabilidade do processo</i>	50
2.4.7 – <i>Custo dos Equipamentos</i>	51
3– METODOLOGIA COMPARATIVA PARA A ESCOLHA ENTRE OS	
PROCESSOS DE TORNEAMENTO E RETIFICAÇÃO.	52
3.1 – TORNEAMENTO.....	52
3.2 – RETIFICAÇÃO.....	55
3.2.1- <i>Comprimento de corte da peça é igual ou menor à largura efetiva de corte do rebolo...</i>	56
3.2.2- <i>Comprimento de corte da peça é maior que a largura efetiva de corte do rebolo.</i>	57
3.3 –DETERMINAÇÃO DO SOBREMETAL LIMITE PARA A ESCOLHA DO MENOR TEMPO DE CORTE ENTRE	
A RETIFICAÇÃO E O TORNEAMENTO.....	59
3.4 – CUSTOS DE PRODUÇÃO	61
3.4.1- <i>Custo da mão-de-obra por peça K_{us}</i>	62
3.4.2 – <i>Custo máquina por peça (com depreciação linear)</i>	62
3.4.3 – <i>Custo de ferramenta por peça</i>	63
3.5 – COMPARAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DE FERRAMENTAL POR PEÇA NA RETIFICAÇÃO E NO	
TORNEAMENTO.....	64
4 – Desenvolvimento Experimental.....	66
4.1 - INTRODUÇÃO.....	66
4.2 – DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	66
4.2.1 - <i>Retificação</i>	66
4.2.2- <i>Torneamento</i>	67
4.3 – BANCOS DE ENSAIOS	67
4.3.1 - <i>Na Retificação</i>	67
4.3.2 – <i>No Torneamento</i>	67
4.4 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	68
4.5 – CONDIÇÕES DE ENSAIO DE TORNEAMENTO.....	68
5.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
5.1 – CONDIÇÕES DE USINAGEM ADOTADAS.....	71

5.2 – VARIAÇÕES DIMENSIONAIS	72
5.3 – RUGOSIDADE SUPERFICIAL RA OBTIDAS NO TORNEAMENTO E NA RETIFICAÇÃO DO AÇO SAE 4340 – ENDURECIDO (51 HRC).....	76
5.4 – ANÁLISE DOS PROCESSOS QUANTO À QUESTÃO AMBIENTAL	79
5.5 – ANÁLISE COMPARATIVA DE TEMPO DE PRODUÇÃO.....	80
5.5.1 – <i>Para uma largura de corte menor ou igual à largura do rebolo ($b_w \leq b_{se}$)</i>	80
5.5.2 – <i>Influência da largura de corte nos tempos de torneamento e retificação</i>	81
5.6 - ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DE FERRAMENTA.....	83
6.0 – CONCLUSÕES.....	85
6.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
7.0- BIBLIOGRAFIA	87
7.1 – BIBLIOGRAFIA CITADA	877
7.2 – BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	911

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – COMPOSIÇÃO BÁSICA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DE UM COMPONENTE[8]	9
FIGURA 2.2 – BASE PARA AMORTECIMENTO SOLDADA, PROJETADA PARA UMA RETIFICADORA CILÍNDRICA (1994). OS TUBOS DE AÇO SÃO RECOBERTOS COM UMA SUBSTÂNCIA VISCOELÁSTICA EM CADA RAMO DA ESTRUTURA EM T E FECHADOS COM TAMPAS NAS EXTREMIDADES PARA PERMITIR A CIRCULAÇÃO DO FLUIDO [9].....	12
FIGURA 2.3- PROCESSO DE PRODUÇÃO CONVENCIONAL E OTIMIZADO PARA UM EIXO DE ENGRENAGEM [7].	16
FIGURA 2.4 – MATERIAIS DE FERRAMENTAS UTILIZADOS PARA USINAGEM DE MATERIAIS ENDURECIDOS [12].....	21
FIGURA 2.5 – MICROESTRUTURA DO AMBORITE (ESQUERDA), COM ALTO CONTEÚDO DE CBN E DBC50 (DIREITA), COM BAIXO CONTEÚDO DE CBN [15].....	26
FIGURA 2.6 – EFEITO DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA FORÇA RADIAL E NO DESGASTE DE FLANCO USANDO UMA ARESTA DE CORTE CHANFRADA [15].....	28
FIGURA 2.7 – TORNEAMENTO DO AÇO 100 CR6 COM VÁRIAS ESTRUTURAS ENDURECIDAS [12].	29
FIGURA 2.8 – VIDA DA FERRAMENTA DE PCBN COM LIGA CERÂMICA PARA OPERAÇÕES DE CORTE EM ACABAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS PARA ROLAMENTO [16].	30
FIGURA 2.9 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE DO REBOLO SOBRE OS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO [21]	33
FIGURA 2.10 – PERDA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO REBOLO E DA VELOCIDADE DE CORTE [20]	34
FIGURA 2.11 – DISPERSÃO DIMENSIONAL DAS PEÇAS RESULTANTES DE DOIS CICLOS DE RETIFICAÇÃO, COM E SEM CALIBRAÇÃO DO REBOLO [22].	37
FIGURA 2.12 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM CICLO DE RETIFICAÇÃO COM..... DETECÇÃO DE CONTATO REBOLO/PEÇA [25]	38
FIGURA 2.13 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE E DO REFRIGERANTE NAS TENSÕES RESIDUAIS DEPOIS DA RETIFICAÇÃO COM DIFERENTES ABRASIVOS[27].....	43
FIGURA 2.14 – FIGURA HIPOTÉTICA DAS DISTRIBUIÇÕES DAS TENSÕES NA SUPERFÍCIE DA PEÇA[16].....	45

FIGURA 2.15 – ESTIMATIVA DE TEMPERATURA DE CAMPO DEVIDO AO ATRITO NA FACE DE FLANCO [16]	46
FIGURA 2.16 – TENSÕES RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CBN NO REBOLO [28].....	47
FIGURA 2.17 – COMPARAÇÃO DAS QUALIDADES DE SUPERFÍCIES E FORÇAS DE CORTE PARA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS NÃO FERROSOS E TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO [16].....	49
FIGURA 3.1 – APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CORTE NA RETIFICAÇÃO EM MERGULHO PARA $BW > BSE$	59
FIGURA 4.1 – CORPO DE PROVA DE AÇO SAE 4340 – TEMPERADO (51 HRC), UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS DE RETIFICAÇÃO E TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO.....	68
FIGURA 5.1 – GRÁFICO COMPARATIVO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS OBTIDAS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES DE TORNEAMENTO UTILIZADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 – ENDURECIDO(51 HRC), COM CONDIÇÕES CONFORME TABELA 5.1.....	73
FIGURA 5.2 – GRÁFICO COMPARATIVO 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.....	74
FIGURA 5.3 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS E A RUGOSIDADE RA PARA A CONDIÇÃO DE TORNEAMENTO 1 –VEL.CORTE $V_c = 180$ M/MIN , PROF.USINAGEM $A_p = 0.5$ MM, AVANÇO $F = 0,08$ MM/ROT.....	75
FIGURA 5.4 – GRÁFICO COMPARATIVO DAS RUGOSIDADES OBTIDAS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES DE USINAGEM UTILIZADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340-ENDURECIDO (51 HRC).	76
FIGURA 5.5 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS RUGOSIDADES OBTIDAS NA RETIFICAÇÃO E NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 – 51 HRC.....	77
FIGURA 5.6 – 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	79
FIGURA 5.7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE TORNEAMENTO E DE RETIFICAÇÃO NA USINAGEM DO AÇO SAE 4340 (51 HRC) E VERIFICAÇÃO DO SOBREMETAL LIMITE.....	81
FIGURA 5.8- TEMPO DE TORNEAMENTO X TEMPO DE RETIFICAÇÃO PARA UM SOBREMETAL FIXO ($SM=0.1$ MM) E VARIAÇÃO NA LARGURA DE USINAGEM B_w	82

FIGURA 5.9- TEMPO DE TORNEAMENTO X TEMPO DE RETIFICAÇÃO PARA UM SOBREMETAL FIXO ($S_M = 0.2 \text{ MM}$) E VARIAÇÃO NA LARGURA DE USINAGEM B_w	82
--	----

INDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Condições de usinagem utilizadas para o experimento de torneamento de aço SAE 4340 – temperado (51 HRc) com inserto de PCBN.....	68
Tabela 5.1 - condições de usinagem utilizadas no torneamento do aço SAE 4340-endurecido (51 Hrc).....	71
Tabela 5.2 - Condições de usinagem utilizadas na retificação do aço SAE 4340 endurecido (51 HRc).....	71

ABREVIATURAS UTILIZADAS

CBN	- do inglês "Cubic Borum Nitride" - Nitreto de Boro Cúbico
CNC	- Controlador Numérico Computadorizado
EA	- Energia Acústica
Hrc	- do inglês "Hardness Rockwell C"
HSC	- do inglês "High Speed Cutting"-alta velocidade de corte
IT	- ISO Tolerance
NC	- do inglês "Numeric control" - controlador numérico
PCBN	- do inglês "Policristalline Cubic Borum Nitride" - Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
SAE	- Society of Automotive Engineers

NOTAÇÕES UTILIZADAS:

a_{dt} - [mm]	- profundidade de dressagem total
a_{dr} - [mm/volta]	- avanço de dressagem
a_p - [mm]	- profundidade de usinagem
AproxIN[xx] -	- aproximação do próximo inteiro maior que xx
b_s - [mm]	- largura do rebolo
b_{se} - [mm]	- largura de corte efetiva do rebolo
b_w - [mm]	- comprimento ou largura de corte da peça
d - [mm]	- diâmetro da peça
d_{af} - [mm]	- distância de afastamento do rebolo/peça
d_{ap} - [mm]	- distância de aproximação do rebolo/peça
d_f - [mm]	- diâmetro final da peça
d_{fr} - [mm]	- diâmetro final do rebolo
d_i - [mm]	- diâmetro inicial da peça
d_{ir} - [mm]	- diâmetro inicial do rebolo
d_s - [mm]	- diâmetro do rebolo
E_m - [m ³]	- espaço ocupado pela máquina
F - [mm/min]	- velocidade de avanço do rebolo
f - [mm/volta]	- avanço da ferramenta
F_{af} - [mm/min]	- velocidade de afastamento do rebolo
F_{ap} - [mm/min]	- velocidade de aproximação do rebolo
F_b - [mm/min]	- velocidade de reposicionamento do rebolo
G -	- relação entre volume de material usinado/ volume de rebolo desgastado
H - [≅ 2400 h]	- número de horas de trabalho por ano
l_{ov} - [%]	- porcentagem da sobreposição do rebolo sobre a largura deste
j - [%]	- taxa de juros
K -	- constante da equação de Taylor
K_{dr} - [R\$]	- custo do dressador/rebolo
K_e - [R\$/ano]	- custo do m ³ ocupado pela máquina
K_{eq} - [R\$]	- custo de controle de qualidade

K_{ft} - [R\$]	- custo da ferramenta por vida T
K_{if} - [R\$]	- custo indireto de fabricação
K_m - [R\$]	- custo de matéria-prima
K_{me} - [R\$/ano]	- custo anual de conservação da máquina
K_{mi} - [R\$]	- custo indireto de matéria-prima
K_p - [R\$]	- custo de produção por peça
K_r - [R\$]	- custo de aquisição do rebolo
K_s - [R\$]	- custo de aquisição do inserto
K_{uf} - [R\$]	- custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação)
K_{ufr} - [R\$]	- custo de ferramental/peça para a retificação
K_{ui} - [R\$]	- custo indireto de usinagem
K_{um} - [R\$]	- custo da máquina
K_{us} - [R\$]	- custo da mão-de-obra(salário) de usinagem
K_v - [R\$]	- custo proporcional às variações das operações anteriores/posteriores
m - [anos]	- idade da máquina
M - [anos]	- vida prevista para a máquina
n - [rotações/min]	- rotação da peça
n_{dr} -	- número de dressagens/vida útil do rebolo
n_{ft} - [≅ 1000]	- vida média do porta ferra/a em qtde de fios de corte
n_R -	- número de trocas do rebolo
n_s -	- número de fios de corte do inserto
n_{sr} - [rotações/min]	- rotação do rebolo
n_t -	- número de trocas da ferramenta
PPd-	- número de peças por dressagem
Sh - [R\$/h]	- salário mais sobretaxas
S_M - [R\$/h]	- custo total da máquina
S_m - [mm]	- sobremetal
S_{mlim} - [mm]	- sobremetal limite
S_{ov} - [mm]	- sobreposição do rebolo
T - [min]	- vida da ferramenta

t_a - [min]	- tempo de aproximação e afastamento da ferramenta
t_c - [min]	- tempo de corte
t_d - [min]	- tempo de dressagem
t_{ft} - [min]	- tempo de troca da ferramenta
t_{merg} - [min]	- tempo de mergulho
T_{mxp} - [min]	- vida da ferramenta para máxima produção
t_p - [min]	- tempo de preparo da máquina
t_R - [min]	- tempo parcial de retificação
t_{rep} - [min]	- tempo de reposicionamento do rebolo p/ o corte
t_s - [min]	- tempo secundário (colocação e retirada da peça)
t_{so} - [min]	- tempo de sparkout (centelhamento)
t_t - [min]	- tempo de torneamento simplificado
t_{tr} - [min]	- tempo total de retificação
T_{tR} - [min]	- tempo de troca do rebolo
t_{tt} - [min]	- tempo total de confecção/peça para o torneamento
V'_s - [mm ³ /mm]	- volume de rebolo desgastado
V'_w - [mm ³ /mm]	- volume de cavaco removido por unidade de tempo
v - [m/min]	- velocidade de corte
V_{mi} - [R\$]	- valor inicial de aquisição da máquina
v_{mxp} - [m/min]	- velocidade de máxima produção
V_{si} - [R\$]	- custo de aquisição do porta ferramentas
x -	- expoente da equação de Taylor
Z -	- lote de peças produzidas
Z_t -	- número de peças usinadas por vida T

Resumo

O estágio atual de globalização da economia tem impulsionado a indústria metal-mecânica a promover uma revolução nos seus processos de fabricação. Isto ocorre em parte devido às necessidades das indústrias aeroespacial e automobilística de desenvolver novos materiais, que proporcionem maior segurança e melhor qualidade aos seus produtos, aliados a um baixo custo. O outro fator que alimenta este processo é a crescente preocupação com o meio ambiente, que pressiona as indústrias a buscarem processos alternativos que minimizem as agressões ao meio ambiente. Estes fatores 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, o que dificulta muitas vezes quanto a uma tomada de decisão sobre qual dos dois processos é o mais adequado. 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, 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

Abstract

The current stage of the globalization has pushed the metalworking industry to promote a revolution in their machining processes. This occurs due to the necessity of the aerospace and automotive industry of developing new materials, in order to obtain more safety and better quality for their products, besides a low cost. Another fact is concerning to the environment, that push the industries to develop new environmental friendly machining processes. These 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, that makes difficult to choose what is the best process. 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

1 – INTRODUÇÃO

Com a globalização da economia a indústria metal-mecânica vem produzindo grandes revoluções nos seus processos de fabricação, graças principalmente à necessidade premente das indústrias aeroespacial e automobilística de desenvolverem novos materiais que proporcionem maior segurança e melhor qualidade, aliadas a baixos custo.

Esta necessidade direcionou diversos setores como as indústrias de materiais de ferramentas e de equipamentos (entre outras) a um alto grau de desenvolvimento tecnológico, levando ao surgimento de materiais duros de usinar como cerâmicas, ligas resistentes a altas temperaturas, superligas utilizadas em aeronaves, “cermets”(compostos cerâmicos/metálicos) etc, bem como de ferramentas capazes de usiná-los. Isto ocasionou também a necessidade de se produzirem equipamentos mais rígidos, com fusos de alta rotação e melhor capacidade de amortecimento, possibilitando assim a usinagem destes materiais.

Além dos fatores citados anteriormente, há também crescente preocupação mundial com as questões relacionadas ao meio ambiente, o que tem influenciado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a pesquisarem processos de produção alternativos, criando tecnologias que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agredam o meio ambiente. Uma destas alternativas é, por exemplo, a usinagem a seco.

Graças ao progresso destas novas tecnologias é possível encontrar-se ferramentas de CBN e cerâmica capazes de usinar aços endurecidos de até 65 HRc em operações de torneamento, fresamento, furação etc realizadas sem a utilização de refrigerantes.

Atualmente, os tornos CNC são mais rígidos e apresentam boa capacidade, podendo com as novas ferramentas e com um simples arranjo torno/porta ferramentas/ferramenta (CBN ou cerâmica), realizar operações de

torneamento em aços endurecidos (acima de 45 HRc) com boa acuracidade, o que até há bem pouco tempo só era possível ser realizado em operações de retificação, com a vantagem de ser mais flexível para executar diversos tipos de usinagens a custo reduzido.

Por sua vez, operações de retificação em mergulho com a utilização de toda a superfície de trabalho do rebolo são mais rápidas e econômicas que o torneamento, quando a qualidade do forjado permite sobremetal pequeno (da ordem de 0,3 mm no diâmetro).

Esses fatos permitem que dois dos mais importantes processos de usinagem, que são a retificação e o torneamento, concorram nas mesmas aplicações em diversas situações, criando dúvidas aos engenheiros de processo quanto a qual dos dois processos deve ser adotado em determinadas situações, pois a decisão envolve qualidade e, principalmente, custos, uma vez que pode significar a tomada de decisão entre comprar-se um torno ou uma retificadora, que pode custar até duas vezes mais.

1.1 - Objetivo

O objetivo deste trabalho é comparar o processo de retificação com o torneamento do aço SAE 4340 – temperado (51 HRc), material largamente utilizado pela indústria em componentes altamente solicitados como eixos, válvulas de motores etc. A pesquisa se limita ao estudo do sobremetal a ser removido e sua influência na determinação de qual é o processo ideal de usinagem a ser adotado. A metodologia utilizada leva em consideração a análise de parâmetros relacionados com a qualidade final do produto, quais sejam: acabamento superficial, dureza e geometria da peça.

1.2 – Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em 7 capítulos.

A seguir será descrito o conteúdo dos demais capítulos deste trabalho:

Capítulo 2 - **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** – são abordadas neste capítulo as novas tendências em usinagens e processos, bem como os conceitos e os elementos referentes aos processos de torneamento de aços endurecidos e retificação.

Capítulo 3 – **Metodologia** – neste capítulo descreve-se uma metodologia para avaliação comparativa dos processos de torneamento e retificação.

Capítulo 4 – **Desenvolvimento Experimental** : descreve-se neste capítulo os bancos de ensaios utilizados, o arranjo experimental e faz-se uma descrição detalhada do procedimento de trabalho.

Capítulo 5 – **Resultados e discussões** – são relacionados e apresentados todos os resultados obtidos na experimentação, bem como breve discussão sobre cada um dos resultados.

Capítulo 6 – **Conclusões e propostas para futuros trabalhos**– com base na experimentação e na teoria são apresentadas as conclusões finais do trabalho e propostas para futuros trabalhos.

Capítulo 7 – **Bibliografia citada/ consultada**

2– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - TENDÊNCIAS

2.1.1 - NOVOS MATERIAIS

A globalização da economia trouxe uma crescente demanda por novos materiais, principalmente por parte das indústrias automobilística e aeroespacial. Isto ocorreu devido ao dinamismo destas áreas no que tange à necessidade de novidades que proporcionem maior segurança com melhor qualidade aos produtos finais, aliados a um mínimo custo.

Face a essas necessidades, a indústria metal-mecânica vem desenvolvendo continuamente novos materiais que atendam à demanda do mercado. Por exemplo, no passado a indústria automobilística tinha como principais materiais o ferro fundido cinzento e as ligas de aço. Hoje pode-se notar uma parcial substituição do ferro fundido cinzento de alguns componentes dos veículos por alumínio, ferro fundido nodular e ferro fundido compactado [1], além de outros.

A indústria aeroespacial também tem grande influência na geração de novos materiais, buscando sempre redução de peso, resistência à corrosão, alta resistência à fadiga e resistência às variações de temperatura, a fim de obter-se maior segurança para os equipamentos .

A chave do progresso deve-se justamente à grande diversidade de materiais existente hoje, pois devido à dificuldade de usinagem destes novos materiais é que os fabricantes de ferramentas, bem como os de máquinas ferramentas, estão continuamente encontrando seus desafios. Tais desafios incluem o reconhecimento dos mecanismos de desgaste da ferramenta e como isso se traduz, em linhas gerais, para o desenvolvimento das ferramentas de corte.

2.1.2.- MUDANÇAS NA MANUFATURA

Diante desse contexto, a indústria metal-mecânica tem feito maciços investimentos para atender às necessidades do mercado. Nas últimas décadas o Japão tem sido um dos líderes na área de manufatura [2] em diversas áreas, pois as firmas japonesas, em conjunto com o governo japonês, investem em alta tecnologia, a fim de manterem esta liderança no futuro. Dentre as pesquisas em andamento, citamos aquelas que podem ser consideradas como a tendência a ser seguida, a saber:

- Novas estratégias de manufatura;
- Práticas de produção ;
- Fusos de alta velocidade;
- Novas ferramentas e insertos;
- Sensoreamento e monitoramento de ferramentas;
- Compensação térmica/técnicas de controle;
- Nova geração de sistemas de manufatura flexível;
- Consciência ecológica nas práticas de manufatura;
- Protótipos rápidos;
- Engenharia de “software” em sistemas de manufatura;
- Processos de micromanufatura;
- Ecomanufatura - Tecnologia de reciclagem em manufatura.

A seguir será feita uma abordagem sobre as principais tendências.

2.1.3 - USINAGEM A ALTA VELOCIDADE

À medida que nos aproximamos do próximo século, verifica-se que mais e mais pesquisadores e indústrias de todo o mundo estão firmemente comprometidos com o propósito de ter processos de usinagem muito velozes e precisamente produtivos [3]. Nota-se este progresso pelo

sucesso obtido nos últimos anos com a aplicação da tecnologia de corte a alta velocidade (HSC-do inglês "high speed cutting") e nos novos desenvolvimentos nas áreas de materiais de corte, ferramentas e máquinas . Há clara tendência em direção à utilização cada vez maior da tecnologia de usinagem a alta velocidade aplicada ao torneamento, retificação, furação etc, principalmente em usinagens de precisão .

O interesse pela usinagem em alta velocidade está definitivamente em ascensão, pois antes de 1990 era muito difícil encontrarem-se máquinas de alta velocidade no mercado. Hoje em dia já se observa grande oferta deste tipo de equipamento, mostrando ser uma tendência crescente devido ao grande número de publicações técnicas relativas ao assunto.

O conceito de "corte a alta velocidade" não é de fácil definição, pois a Norma Européia define 1000 m/min como alta velocidade para ferramentas de fresamento, entretanto a usinagem de um aço endurecido (dureza acima de 45 HRc) à velocidade de 200 m/min também pode ser considerada como usinagem a alta velocidade de corte. No caso, por exemplo, do fresamento de alta velocidade do alumínio hoje já estão sendo utilizadas velocidades de corte V_c de até 8.000 m/min[4].

Os avanços tecnológicos para implementar o aumento das velocidades já estão em desenvolvimento. Esses são:

- Melhoramento estrutural das máquinas (maior amortecimento e rigidez);
- Aumento das taxas de avanço com precisão estabelecida para a máquina;
- Fusos de troca rápida para reativação mais eficiente após uma colisão;
- Fusos de alta e baixa velocidades coexistindo na mesma máquina;
- Melhora na tecnologia de mancais para fusos por meio de lubrificação da pista, revestimentos de titânio - alumínio nas pistas dos rolamentos e também o uso de mancais aerostáticos;
- Melhora nas interfaces ferramenta/fuso;

- Balanceamento estático para ferramentas compactas e dinâmico para ferramentas com grande comprimento;
- Refrigeração a alta pressão (1000 psi) através da ferramenta;
- Melhor filtragem do líquido refrigerante;
- Novos materiais de corte, revestimentos e geometrias apropriadas a cada utilização;
- Tempos de troca de ferramentas reduzidos.

2.1.4 - NEAR-NET-SHAPE -

Atualmente, na manufatura todos querem produtos que durem mais, custem menos e que tenham melhor desempenho. Procuram-se melhorar a qualidade superficial e formas, aumentar as velocidades de usinagem, a vida da ferramenta e taxas de avanço. Desta forma, tem aumentado a ênfase para o controle dos custos na manufatura através da utilização crescente de materiais próximos da forma final, mais conhecidos como "near-net-shape", que podem ser forjados ou fundidos [5].

Atualmente, a indústria automotiva japonesa é considerada como a maior usuária mundial de componentes "near-net-shape" conformados a frio, com média de 50 kg por carro, enquanto na Europa são utilizados 25 kg [6].

O processamento do "near-net-shape" permite significativas reduções de perdas de materiais, tempo de usinagem e consumo de energia. Contudo, a usinagem destes materiais demanda alguns cuidados quanto à correta escolha da geometria e recobrimento dos insertos a serem utilizados em cada caso. Ao remover-se menos material numa operação de near-net-shape ocorre a produção de cavaco mais fino, que se dobra, mas não se quebra facilmente, tornando-se de difícil remoção.

Outra consideração a ser feita é referente ao calor, pois muitas operações de near-net-shape são realizadas com altas taxas de avanço e altas velocidades de corte, com correspondente alta geração de calor. Além disso, o cavaco é produzido numa região próxima ao quebra cavaco

do inserto, causando crateramento devido à dura obstrução do inserto sobre o cavaco para dobrá-lo.

Finalmente, as forças de corte geradas podem ser muito altas neste tipo de aplicação, sendo, às vezes, necessária uma passagem anterior com altas taxas de avanço, pois insertos apropriados para acabamento não têm resistência de aresta apropriada para lidar com altas taxas de avanço.

Devido a estes desafios é que foram desenvolvidas novas geometrias de quebra cavacos para a usinagem de near-net-shape, que devem quebrar os cavacos em operações de acabamento e, ao mesmo tempo, proporcionar robustez desejada à aresta para lidar com altas taxas de avanço e resistir às irregularidades das superfícies das peças.

2.1.5 - USINAGEM A SECO

Pode-se dizer que o coração de uma indústria é o seu departamento de produção. Com a crescente preocupação com o meio ambiente aliada à parte econômica, deve-se priorizar a redução do emprego de materiais e energia, diminuindo-se assim a quantidade e o potencial de risco tanto de resíduos como de emissões.

A fonte de poluição mais problemática num ambiente de manufatura são os fluidos refrigerantes, pois são perigosos nos locais de trabalho e o seu manuseio e descarte estão cada vez mais difíceis devido aos altos custos envolvidos [7]. Hoje, os custos relativos aos refrigerantes chegam a corresponder a 17% dos custos do produto [8]. A figura 2.1 apresenta a composição básica dos custos de fabricação de uma peça.

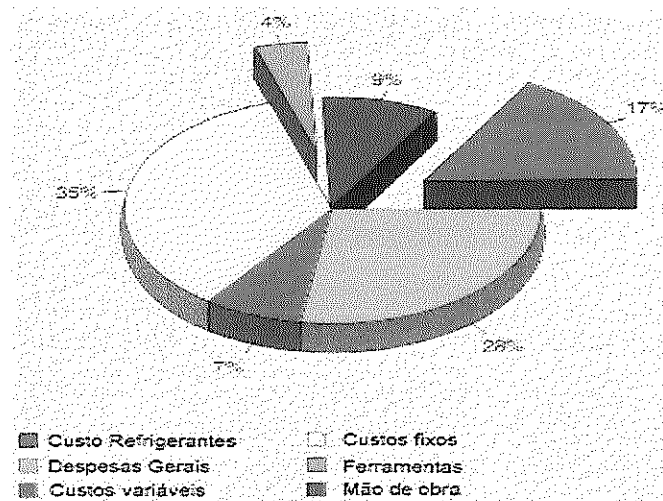


FIGURA 2.1 – COMPOSIÇÃO BÁSICA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DE UM COMPONENTE[8]

Uma boa alternativa para se alterar a composição dos custos acima (talvez a de maior tendência) é a substituição de processos que requerem refrigerante pela usinagem a seco, pois, apesar da provável mudança no processo de produção, muito provavelmente obter-se-ão benefícios ecológicos e econômicos com esta modificação. Hoje, grande número de operações de retificação, grandes consumidoras de líquidos refrigerantes, têm sido substituídas por operações de torneamento de alta precisão. Este processo não requer fluidos refrigerantes, sendo capaz de gerar componentes com precisão dimensional na faixa micrométrica e rugosidade superficial na faixa submicrométrica.

Graças às novas tecnologias empregadas na fabricação de máquinas ferramentas, mais rígidas e com maior amortecimento, bem como ao aparecimento de novos materiais de corte, com novas geometrias, composição e recobrimentos apropriados à usinagem de aços endurecidos, já é possível substituir alguns processos de usinagem pelo processo de usinagem a seco.

2.1.6 - EVOLUÇÃO DA RETIFICAÇÃO

Atualmente pergunta-se com muita frequência : Irá a retificação ser substituída pela usinagem a alta velocidade ou pelo torneamento de materiais endurecidos? - Provavelmente não, dizem os especialistas. A retificação é um processo caro, mas o torneamento de materiais endurecidos também [9]. Tolerâncias muito apertadas e maiores Cpk's favorecem a retificação em relação ao torneamento de materiais endurecidos.

Além disso, a usinagem de materiais difíceis de usinar como cerâmicas, "cermets"(compostos cerâmico/metálicos), compósitos, materiais reforçados tipo "whisker-reinforced" , ligas resistentes a altas temperaturas, superligas utilizadas nas aeronaves e componentes ópticos feitos de "cermet", cerâmica e vidro só podem ser realizadas com a retificação.

Com o objetivo de analisarem-se as tendências na retificação com superabrasivos, foi realizado um trabalho conjunto envolvendo pesquisadores, construtores de máquinas, fornecedores e usuários da tecnologia de retificação [9]. No topo da lista estava a otimização da retificação com CBN, com baixo custo e alta qualidade dos rebolos de CBN. Outros itens desejados são:

- Conjunto de dressagem rígido que permita a dressagem do rebole em frações de micrometros;
- Fuso super rígido com o mancal no interior do cubo da rebole;
- Um equipamento menor (328 cm^3) com uma configuração flexível de peças;
- Sistema de posicionamento deslizante grande e precisamente controlado;
- Projeto modular e peças mais padronizadas;
- Sistemas de dressagem ligados ao CNC para monitorar tamanho do rebole, posição do dressador e posicionamento do rebole com relação à peça;
- Sistema de refrigeração com sensores de monitoramento de alta segurança de baixo custo ligados ao controlador da máquina.

- Sensores para o monitoramento da vida da ferramenta, dinâmica da máquina, diagnósticos sobre o fuso e o motor, condições do rebolo e para detecção de contato entre diamante/rebolo e rebolo/peça, a fim de melhorar o tempo de ciclo.

As retificadoras, que já são rígidas, têm de ser mais rígidas devido ao aumento da retificação com superabrasivos. Em virtude desta necessidade, estão aparecendo outros materiais para substituir o ferro fundido na construção das bases das máquinas em geral, pois o ferro fundido transmite melhor as vibrações devido às suas juntas sólidas. As alternativas encontradas incluem coberturas com elastômeros para absorver vibrações, “Granitan®” (um granito epóxi com capacidade de amortecimento natural), “Harcrete” (material sintético da base com melhor amortecimento que o ferro fundido), além de outras inovações que utilizam sistemas de amortecimento viscoelástico com mancais hidroguiados, o que melhora a acuracidade e durabilidade da máquina.

A utilização de melhores amortecimentos e estabilidade térmica permitem a aplicação de maiores forças de retificação para a obtenção de medidas finais e, também, a utilização de rebolos mais grosseiros para alcançar o acabamento necessário, aumentando assim a taxa de remoção de material e economizando dinheiro. A figura 2.2 apresenta um modelo de base projetada especialmente para obter-se um melhor amortecimento (cobertura dos tubos com substância viscoelástica) aliado a uma maior estabilidade térmica, obtida pela circulação do fluido através dos tubos de aço.

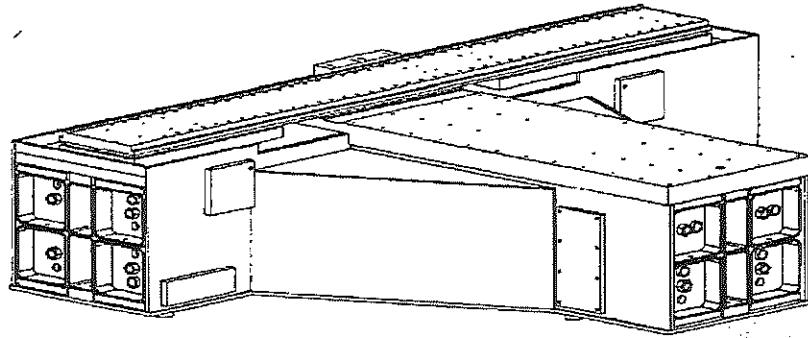


FIGURA 2.2 – BASE PARA AMORTECIMENTO SOLDADA, PROJETADA PARA UMA RETIFICADORA CILÍNDRICA (1994). OS TUBOS DE AÇO SÃO RECOBERTOS COM UMA SUBSTÂNCIA VISCOELÁSTICA EM CADA RAMO DA ESTRUTURA EM T E FECHADOS COM TAMPAS NAS EXTREMIDADES PARA PERMITIR A CIRCULAÇÃO DO FLUIDO [9].

Outra tendência é a construção de equipamentos mais rígidos e de menor tamanho, pois as peças mais difíceis de serem usinadas são aplicadas em aeronaves, não havendo a necessidade de uma mesa de retificadora com dimensões maiores que 1 x 0,5 m para usinar uma lâmina de turbina, por exemplo.

A Toyoda construiu uma retificadora para retificação com CBN (GZ63P) de virabrequins, onde seu rebole de diâmetro 400 mm x 10 mm de largura se desloca à velocidade de 160 m/s. Hoje já é possível encontrarem-se retificadoras com rigidez de até 530 N/ μm , um sistema de usinagem do rebole (truíng) com rigidez 150N/mm e resolução de 0.01 μm suficiente para otimizar os rebolos de superabrasivos, sendo também flexíveis para a utilização de rebolos de óxido de alumínio e outros sintéticos, com CNC baseado no sistema PC [9].

Outro problema freqüente em retificação é a dificuldade em se saber o que está acontecendo durante o ciclo de retificação. Hoje sistemas de aquisição de dados computadorizados verificam e gravam valores de potência, movimento do rebole e tamanho da peça, entre outras medidas, o que permite obter fundamentos para otimizar o processo de retificação. Em alguns casos o operador descreve a peça a ser usinada e o sistema de controle providencia velocidades, avanços e seqüência de operações,

permitindo ainda o armazenamento de ciclos de processos comuns a serem utilizados mais tarde.

O CNC deve comandar todo o processo de retificação, controlando todos os eixos e movimentos.

Para o próximo século pode-se prever uma revolução nos processos de usinagem por abrasão, tais como fusos de levitação magnética, que permitem rotações de até 40.000 rpm com potência de 15 kW e tamanhos reduzidos, mancais hidrostáticos a água, dressagem contínua de rebolos vitrificados de porosidade induzida e, para cerâmicas, dressagem eletrolítica em processo com rolos diamantados em liga metálica [9].

Com o advento do CBN e de equipamentos mais rígidos e com maior amortecimento, os processos de retificação deixaram de ser lentos. Atualmente podem-se encontrar equipamentos girando a velocidades de até 160 m/s, havendo relatos na literatura de testes bem sucedidos realizados com CBN a 150-250 m/s e até mesmo na velocidade do som.

Qual será o limite para a fixação das velocidades no futuro? Com certeza a segurança dos operadores e a máquina ferramenta propriamente dita, pois atualmente poucos fabricantes produzem retificadoras de alta velocidade com a tecnologia dos novos materiais e estruturas desenvolvidas recentemente, pois equipamentos que rodam a 150 m/s no chão de fábrica certamente precisam ter muita rigidez e um excelente amortecimento.

2.1.7 - TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS (“HARD TURNING”)

O torneamento de materiais endurecidos (“*hard turning*”) é hoje um processo utilizado em muitas indústrias, desde automotivas, aeronáuticas, indústrias de máquinas ferramentas, ferramentas, caminhões e implementos agrícolas, instrumentos médicos, entre outros.

O processo de torneamento de materiais endurecidos utiliza normalmente o Nitreto Cúbico de Boro (do inglês CBN-“cubic boro nitride”) sólido, pontas de CBN, ou ferramentas de cerâmica. Os cristais de CBN são produzidos a partir de uma combinação molecular entre o Nitrogênio (N) e o Boro (B) sob uma temperatura de 1.400 a 1.600 °C e pressões de até 5-6 kPa. Quando é sinterizado com uma liga, os cristais desenvolvem uma forma normalmente conhecida como Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (do inglês PCBN-“policristaline cubic boro nitride”) [10].

Com a eliminação de algumas etapas no torneamento macio devido ao surgimento do “near-net-shape”, o torneamento de materiais endurecidos pode ser utilizado como primeira e última etapa do processo de fabricação, pois a utilização da retificação para usinar peças complexas (com muitos diâmetros diferentes) torna-se um desafio, devido à necessidade de rebolos especiais para cada caso.

Embora o CBN seja muito versátil no torneamento de aços endurecidos, ferro fundido cinzento e nodular, metais sinterizados e materiais exóticos, há materiais que não podem ser bem torneados pelo CBN, como cromo-platina, bronze, plásticos, latão, aços macios e aço inox.

O inserto de CBN pode variar de acordo com o conteúdo de CBN contido, a saber:

•Alto conteúdo de CBN ⇒ o inserto pode alcançar altas velocidades, porém será mais frágil;

•Baixo conteúdo de CBN ⇒ o inserto fica menos abrasivo, mas pode absorver melhor os choques de cortes interrompidos.

A rigidez do sistema também é muito importante para obter-se produtividade e bom desempenho. Deve-se adotar medidas preventivas como manutenção da ferramenta, redução de obstáculos e saliência das peças, a fim de eliminarem-se vibrações.

O sucesso da operação depende também do uso do inserto apropriado para cada aplicação. Devem ser considerados parâmetros como material da peça, profundidade de corte, interrupções no corte e qualidade da superfície desejada. É possível melhorar bastante a acuracidade do processo caso se utilize um sistema de fixação exclusivo para as ferramentas de torneamento de materiais endurecidos, pois a fixação do inserto ao suporte só será feita uma vez.

Quanto ao fator custo há controvérsias com relação a qual processo é mais vantajoso entre retificação e torneamento de material endurecido. É possível torneare materiais endurecidos em qualquer torno CN ou CNC utilizados para o torneamento comum, sendo que com o uso de insertos de CBN à disposição hoje podem-se atingir velocidades de até 300 m/min. O custo do CBN caiu vertiginosamente nos últimos anos, podendo ser encontrado hoje a US\$ 25,00 por aresta de corte

As vantagens do torneamento em relação à retificação são: a flexibilidade de executar várias tarefas simultaneamente e a possibilidade de cortar materiais endurecidos, graças às novas ferramentas existentes. Além disso, há que se considerar que o torneamento produz cavaco limpo, pronto para ser reciclado, enquanto a retificação produz um lodo, que não pode ser reutilizado.

Como o espaço hoje também deve ser um fator a ser considerado, deve-se mencionar que os rebolos são maiores, mais volumosos e difíceis de se armazenarem do que os insertos de CBN.

Deve-se, portanto, a popularidade do torneamento de materiais endurecidos ao avanço da tecnologia das ferramentas de CBN nos últimos anos. Enquanto no início da década de 90 havia poucas opções de insertos disponíveis no mercado, hoje há muitas possibilidades de escolha, com opções que atingem velocidades de até 1520 m/min [10].

O avanço da tecnologia do CBN permite hoje a usinagem com cortes interrompidos sem problemas, abrindo a faixa de atuação do processo, como fresamento (incluindo de acabamento), sendo que muitas indústrias automobilísticas que anteriormente retificavam blocos de motor de ferro fundido cinzento agora usam fresamento. Essas operações são executadas a seco, o que é um fator ecológico altamente favorável.

Uma seqüência básica de operações consiste de forjamento, usinagem, tratamento, usinagem de materiais endurecidos e retificação. É possível que no futuro os processos sejam: - forjados near-net-shape, tratamento térmico, torneamento de materiais endurecidos e super acabamento [7].

A figura 2.3 a seguir apresenta um exemplo de aplicação para o exposto acima.

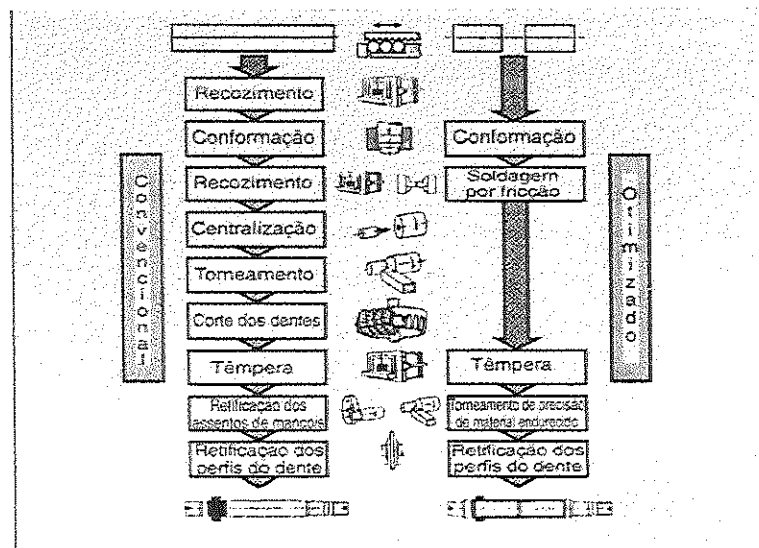


FIGURA 2.3- PROCESSO DE PRODUÇÃO CONVENCIONAL E OTIMIZADO PARA UM EIXO DE ENGRENAGEM [7].

2.2 - TORNEAMENTO

O torneamento concorre hoje com a retificação graças à existência de novas ferramentas de corte, bem como aos novos equipamentos, que são mais rígidos, mais rápidos e mais eficientes. Desde que a primeira

ferramenta de corte foi desenvolvida, tem havido periodicamente novos desenvolvimentos de materiais de corte, o que leva a uma constante revolução nas técnicas de usinagem. Estes desenvolvimentos permitiram ao torneamento de materiais endurecidos (conhecido como “hard turning”) estender seus limites, seja em direção a um ciclo mais curto de usinagem ou ainda a operações de desbaste e acabamento de materiais endurecidos.

Em virtude desta evolução nas ferramentas de corte, o “hard turning” tem hoje um nicho de atuação, pois se encaixa perfeitamente nas várias tendências atuais de manufatura, especialmente na indústria automotiva. As tendências mais importantes neste contexto são consistência dimensional e flexibilidade.

Muitos fabricantes consideram que a utilização de materiais adequados ao near-net-shape são essenciais ao hard turning, principalmente na fabricação de pistas de rolamentos, engrenagens, eixos de pinhões e grande variedade de peças de desgaste, pois muitas destas peças se encaixam numa faixa de dureza de 50 a 65 HRC, com tolerâncias freqüentemente menores que 0,01 mm, indicando portanto a tendência em direção à utilização do near-net-shape para obter-se menores ciclos de fabricação e arranjos mais simples [11].

2.2.1 - Equipamentos

Componentes de aço altamente tensionados são freqüentemente endurecidos, a fim de melhorar sua resistência ao desgaste e robustez. Quando os componentes são geometricamente complexos, o tratamento térmico tende a produzir mudanças de forma inaceitáveis e, caso as necessidades de acabamento superficial, dimensões e formas sejam altas, os componentes devem ser usinados na forma endurecida.

No passado, materiais com dureza acima de 60 HRC eram normalmente retificados. Atualmente os novos materiais de ferramentas existentes já permitem que materiais com dureza acima de 60 HRC

sejam torneados em operações de desbaste e acabamento em equipamentos CNC comuns.

Contudo é importante salientar que a rigidez do sistema de usinagem é crítica, pois a usinagem de um componente com profundidade de corte de 0,3 mm não requer muita potência de máquina, porém a força na ferramenta pode ser até 3 vezes maior do que nos torneamentos normais. Torna-se necessária, portanto, especial atenção a itens como rigidez da máquina, sistema de fixação do porta-ferramentas, manuseio da ferramenta etc, a fim de não sacrificar a vida da ferramenta. Observada a rigidez do sistema, faz-se necessária ainda a adoção correta do material do inserto, geometria e preparação de aresta mais adequadas à usinagem do material da peça. As ferramentas mais comuns para este tipo de usinagem são as de CBN e cerâmica (óxidos de alumínio – titânio - carbetos - Al_2O_3-TiC).

Nos casos de aplicação em torneamento de “near-net-shape”, a acuracidade também deve ser considerada como um item crítico. Desta forma, os projetos modernos de máquinas para este fim são tipicamente rígidos e compactos, com células automatizadas e guias de ferro fundido prismáticas. A literatura relata ainda a tendência de substituição das torres de ferramentas por conjuntos de ferramentas, conhecidas como “gang tools”, com maior rigidez e de rápida indexação, com até 5 ferramentas por conjunto, pois raramente uma operação de “hard turning” necessita de um número maior de ferramentas [11]. Para melhorar a acuracidade das peças, seria recomendável que se buscassem melhorias no fuso, tais como melhor estabilidade térmica e balanceamento das cargas aplicadas .

Além destas melhorias, é possível ainda utilizar-se uma programação de submicron, um processo que divide o passo da ferramenta em pequenas parcelas de $0,3\mu m$, proporcionando uma resolução 10 vezes melhor do que os CNC's para pequenos tornos, melhorando a qualidade em pelo menos 30%. Para pequenas máquinas utilizando uma associação de “gang tooling” com a programação

submícron pode-se obter uma acuracidade de 0,01 mm e para equipamentos novos com estas características obtém-se uma acuracidade de até 0,008 mm com $C_{pk} = 2$.

Outro ponto importante a ser considerado é o nível de vibração gerado pelas transmissões dos fusos realizadas através de engrenagens nas operações de acabamento no "hard turning", pois mesmo os melhores sistemas acabam transmitindo níveis inaceitáveis de vibração para o corte. Por este motivo, já se produzem transmissões dos fusos através de correias para esta classe de trabalho, com melhores resultados que o sistema por engrenagens.

Considerando-se que a diminuição do ciclo do processo seja um item de suma importância para redução de custos, faz-se necessária também a adoção de um sistema eficiente de alimentação automática de peças, de tal forma que as peças sejam posicionadas com precisão, com rapidez e com boa fixação (centralização, concentricidade etc), pois ganhos significativos podem ser obtidos com a melhora do manuseio eficiente de peças, ao contrário do aumento das velocidades de corte.

2.2.2 – Ferramentas para usinagem de materiais endurecidos

Na usinagem de materiais endurecidos assim como em outras formas de usinagem, a energia aplicada para a remoção do cavaco é, em grande parte, convertida em calor na zona de corte. Isto significa que, dureza ou resistência maior da peça implicará maiores níveis de força e energia envolvidas. Por exemplo, o torneamento de um rolamento endurecido envolve forças até duas vezes maiores do que o mesmo torneamento de um material normal, nas mesmas condições de usinagem [12].

Dependendo da combinação entre a ferramenta e o material da peça, as temperaturas nesta interface podem atingir até 1000°C, sendo criadas assim as condições desejadas para o amolecimento do material a ser removido. Tais variações promovem tensões mecânicas e térmicas na ferramenta, que devem ser consideradas quando da escolha do seu

material, devendo o mesmo ter uma adequada resistência térmica e dureza a quente, além de ser quimicamente estável, isto é, resistente à oxidação e difusão em elevadas temperaturas. As exigências também são rigorosas com relação à resistência ao desgaste e resistência da aresta de corte, particularmente em usinagens de acabamento, pois micro fraturas podem comprometer o acabamento superficial da peça.

O desgaste da ferramenta, por exemplo, afeta indiretamente a superfície da peça quanto a sua dimensão e forma, devido ao aumento da temperatura e das forças passivas e afeta diretamente o diâmetro da peça quando a aresta de corte se desgasta. Este último fator tem particular importância na usinagem de peças de grandes superfícies, pois não é possível, neste caso, compensar-se este desgaste durante o corte.

Dos materiais de ferramentas de corte disponíveis no presente, aqueles que podem ser utilizados eficientemente para usinagem de materiais endurecidos sob condições de corte contínuo e interrompidos estão limitados às cerâmicas e ao nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN).

Os óxidos cerâmicos são classificados conforme sua composição, devendo ser feita uma distinção entre as cerâmicas puras e compostas (mistas). Apesar de suas propriedades de resistência ao calor e difusão, a cerâmica pura não é apropriada para utilização em usinagens de materiais endurecidos, pois sua aresta de corte não possui adequada resistência ao desgaste e robustez. Apenas os compostos cerâmicos têm as propriedades necessárias para a usinagem de materiais endurecidos, em virtude da sua ligação com carbetos metálicos tais como carbetos de titânio.

Já o PCBN, o segundo material mais duro conhecido (o primeiro é o diamante), é fabricado sob condições similares às aquelas utilizadas para sintetizar o diamante, usando-se pressões extremamente altas (60 a 80 kbar) e altas temperaturas (1500 a 2000°C). De acordo com o tipo de solvente/catalisador utilizado no processo de síntese, os nitretos de



boro podem ser ligados a uma liga metálica ou cerâmica numa segunda fase.

A figura 2.4 apresenta alguns materiais de ferramentas utilizados para usinagem dura, faixas de aplicações, dureza e resistência à fratura das mesmas.

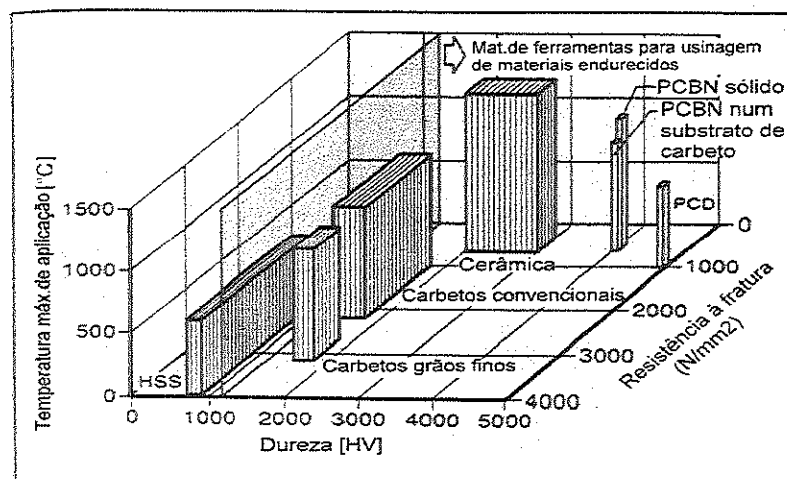


FIGURA 2.4 – MATERIAIS DE FERRAMENTAS UTILIZADOS PARA USINAGEM DE MATERIAIS ENDURECIDOS [12]

2.2.2.1 - Modos de desgaste da ferramenta

Operações de usinagem envolvem deformação plástica do material à frente da ponta do inserto. As altas temperaturas resultantes deste contato (atingem até 1000°C) e o atrito entre ferramenta e peça promovem a retirada do material. Entretanto, 80% do calor gerado é dissipado através do cavaco.

As condições de usinagem, material da peça e o processo de corte devem ser estudados para determinarem-se os mecanismos de desgaste que irão influenciar na vida da ferramenta. A durabilidade e a qualidade da ferramenta determinarão a qualidade da peça, pois inserto deformado, gasto, rústico, lascado ou quebrado produzirá peças de baixa qualidade. Toda operação de corte experimenta sete possíveis modos de

desgaste, a saber : desgaste abrasivo, aderência(“slip stick” ou “smearing”), fadiga mecânica ou térmica, reações químicas, sobrecarga estática e deformação plástica [13].

Dependendo do material da peça e da ferramenta utilizada, alguns destes fatores podem influenciar mais ou menos na vida da ferramenta.

2.2.2.2 - Coberturas de Carbetos

Com o objetivo de aumentar-se a vida das ferramentas, foram desenvolvidas coberturas a serem aplicadas sobre os insertos, a fim de evitar-se alguns tipos de desgaste mencionados acima. Suas principais aplicações são:

- **Multi cobertura de Nitreto de Titânio - TiN** - recomendada para aplicações que necessitam de boa lubrificação, a fim de prevenir o aparecimento de aresta postiça de corte; esta cobertura também ajuda na usinagem de materiais muito elásticos ou dúcteis;
- **Oxido de Alumínio - $Al_2 O_3$** - excelente para usinagens abrasivas e a altas temperaturas. É relativamente inerte e protege o substrato de danos;
- **Multi coberturas com Deposição Química por Vapor (CVD) de carbeto de titânio (TiC) - nitreto de titânio (TiN)** - o carbeto de titânio-TiC, a camada mais dura, ajuda a manter a aresta de corte afiada e dá boa resistência ao desgaste de flanco; o nitreto de titânio-TiN, com tamanhos de grão mais finos, dão boa resistência a crateramento e maior lubrificação à superfície, graças ao seu baixo coeficiente de atrito;
- **Coberturas com Deposição Física por Vapor (PVD) de Nitreto de Titânio-TiN**- protege o substrato de carbeto das tensões de compressão, aumenta a resistência à fratura e produz uma granulação mais fina e lisa; a baixa temperatura do processo PVD também evita a fragilidade e porosidade das

arestas, típicas nas coberturas tipo CVD, o que propicia cortes mais limpos e forças de corte reduzidas.

2.2.2.3 - *Insertos Cerâmicos*

Diversos fabricantes de ferramentas de corte indicam a cerâmica para a usinagem de materiais endurecidos com dureza na faixa de 50 a 62 HRC, pois o inserto de óxido de alumínio-carbeto de titânio- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (prensado a quente ou composto cerâmico preto), com uma preparação de aresta adequada (afiação tipo “T land”- simples ou dupla), pode executar tão bons serviços quanto o CBN, podendo atuar numa faixa de velocidade de 76 a 107 m/min.

Este tipo de afiação é importante para se evitar o principal modo de falha deste tipo de inserto, que é o crateramento; com esta afiação, o crateramento ocorrerá longe da aresta de corte, propiciando maior durabilidade ao inserto. Ângulos negativos com “T-land” compensam a baixa resistência transversal à ruptura das cerâmicas.

As vantagens da cerâmica, tais como o óxido de alumínio e o nitreto de silício – Si_3N_4 são melhores observadas na usinagem de ferro fundido do que no aço. Pode-se ter as seguintes aplicações para estes insertos:

- **Inserto de óxido de alumínio** - é indicado para usinagens de ferro fundido com profundidades de corte uniformes e cortes não interrompidos;
- **Inserto de nitreto de silício** - indicado para usinagens de ferro fundido com profundidades de corte variáveis ou cortes interrompidos;
- **Inserto de óxido de alumínio com adição de carbeto de titânio** - indicado para acabamentos em ferro fundido e aços endurecidos na faixa de 60 HRC.

As recomendações mais usuais para se trabalhar com insertos cerâmicos são [13]:

- Associar o material a ser usinado com o tipo de ferramenta mais adequada;
- melhores resultados serão obtidos na usinagem de grandes lotes, materiais endurecidos ou peças grandes;
- Utilizar a mais alta velocidade de corte possível e insertos quadrados ou redondos;
- Máquinas ferramentas e sistemas de fixação rígidos;
- Sistemas de fixação que permitam ciclos de usinagem menores;
- Transportadores de cavaco com capacidade mínima de 9 kg/min;
- Treinamento específico para os operadores para o trabalho com cerâmica;
- Refrigerantes não são recomendados na usinagem de ferro fundido e aço;
- Não utilizar a cerâmica em aplicações com grandes impactos ou onde a cobertura esteja sujeita a choques extremos.

2.2.2.4 - O PCBN ampliando os limites da usinagem

O “hard turning” não surgiu repentinamente com a introdução do BZN PCBN compacto pela GE Superabrasives há duas décadas atrás, pois as ferramentas cerâmicas já existiam para algumas aplicações de acabamento e as ferramentas de diamante justificavam seus altos custos para grandes lotes de produção para algumas ligas de alumínio. Contudo, o PCBN veio para preencher uma lacuna, colocando o hard turning como uma das principais correntes da manufatura.

O PCBN revolucionou os métodos de usinagem, proporcionando uma alternativa econômica e eficiente à retificação de materiais endurecidos, pois com sua dureza e resistência elevadas (é o segundo material mais duro conhecido) é possível torner-se aços e outros materiais de até 65 HRC, além de permitir a redução na frequência de

trocas de ferramentas para um nível similar aos de torneamento convencionais com insertos de alta performance, o que viabilizou a sua utilização para trabalhos de pequenos lotes de peças.

O PCBN apresenta uma extraordinária combinação de propriedades. Sua dureza lhe dá uma resistência transversal de ruptura e uma resistência a impactos mais alta que a maioria das cerâmicas, possibilitando sua utilização em muitas operações de corte interrompidos, inclusive de furos com rasgos de chaveta, operações de desbaste e acabamento de aços, materiais sinterizados (duros e abrasivos), entre outros metais, com dureza de até 65 HRC.

As ferramentas de PCBN são diferenciadas pelo conteúdo de CBN em sua estrutura, podendo ser fabricadas com um alto conteúdo de CBN (acima de 70% de CBN) ou baixo conteúdo (69% ou menos) [14]. Consequentemente, há diferenças de comportamento quanto ao desgaste entre os dois tipos, dependendo do tipo de aplicação. Atualmente podemos encontrar ferramentas de corte com PCBN disponíveis em vários formatos, a saber: em camadas sinterizadas ou soldadas num substrato de carbeto ("tipped") ou na forma de insertos sólidos.

A diferença fundamental entre os dois tipos de materiais pode ser visualizada na microestrutura dos dois materiais mostradas na fig 2.5a e 2.5b respectivamente. Em comparação com o AMBORITE (alto conteúdo de CBN), fica evidente o tamanho reduzido do grão e da concentração de CBN no DBC50 (baixo conteúdo de CBN) [15].

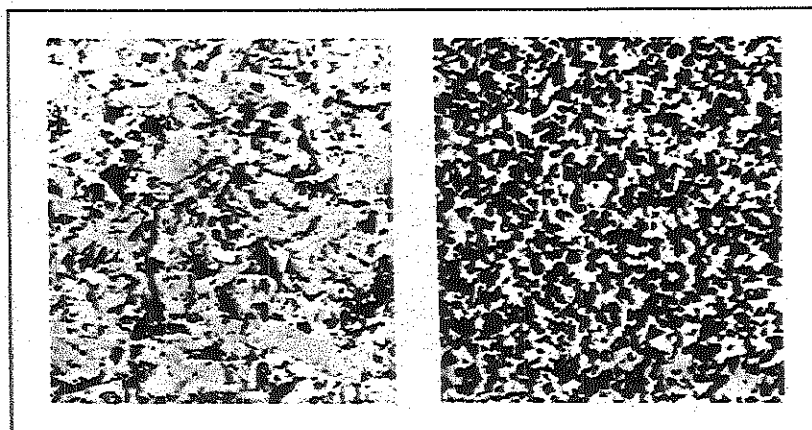


FIGURA 2.5 – MICROESTRUTURA DO AMBORITE (ESQUERDA), COM ALTO CONTEÚDO DE CBN E DBC50 (DIREITA), COM BAIXO CONTEÚDO DE CBN [15]

Essa diferença microestrutural entre os dois materiais se reflete no seu comportamento durante a usinagem, pois suas propriedades mecânicas, físicas e térmicas têm diferenças significativas, principalmente na resistência à fratura e na condutividade térmica. O AMBORITE apresenta maior resistência ao desgaste que o DBC50 em operações com desgaste abrasivo (usinagem de materiais sinterizados endurecidos e alumínio com alto conteúdo de silício), porém em operações de acabamento em aços endurecidos ($a_p < 0,5$ mm) isto não ocorre, devido às mais baixas temperaturas envolvidas neste tipo de operação.

Para se entender o motivo desta diferença de comportamento, é importante examinar-se como estes dois materiais trabalham. Durante a usinagem de um material endurecido com PCBN, uma combinação de ângulo negativo, alta velocidade de corte e profundidade de corte geram calor e deformam plasticamente o material da peça na zona de corte. O calor ainda facilita a deformação e remoção do cavaco. Contudo, nas operações de acabamento, menos calor é gerado, devido às menores profundidades de corte. Como o AMBORITE tem uma alta condutividade térmica, o calor é dissipado da zona de corte através da ferramenta e a energia necessária para provocar a deformação plástica do material a ser

removido é perdida . Esta redução na deformabilidade do material implica em maiores cargas mecânicas sobre a ferramenta e, portanto, maior desgaste da mesma [15].

Já o DBC50, com baixo conteúdo de CBN (65%) numa liga de nitreto de titânio - TiN, tem um comportamento diferente, pois o TiN atua como uma barreira à transferência de calor, além de multiplicar a resistência química do inserto. Esta baixa condutividade térmica (60% menor que os outros tipos de PCBN) faz com que o calor gerado fique concentrado na zona de corte, produzindo assim a deformação plástica necessária à remoção do material e assegurando a eficiência do processo de corte. Além disso, sua estrutura de grãos mais finos lhe dá uma grande resistência na aresta de corte.

2.2.2.4.1 - Geometria da ferramenta de PCBN

Na usinagem de aço não endurecido com ferramentas convencionais, é comum o emprego de geometria de corte positiva (ângulo de saída positivo), a fim de reduzir as forças exercidas pela ferramenta sobre a peça. Com ferramentas de PCBN, ao contrário, testes demonstram que geometrias de corte negativas, aliadas a altas velocidades de corte, são necessárias para a usinagem de materiais endurecidos[15].

Alguns experimentos foram realizados com ferramentas usando geometrias negativas, positivas e neutras para o DBC50 usinando um aço endurecido (58 HRC), comparando os resultados em função da força radial e do desgaste da ferramenta , utilizando-se de insertos com aresta de corte chanfrada (0,1 mm x 20°), conforme ilustrado na figura 2.6 a seguir.

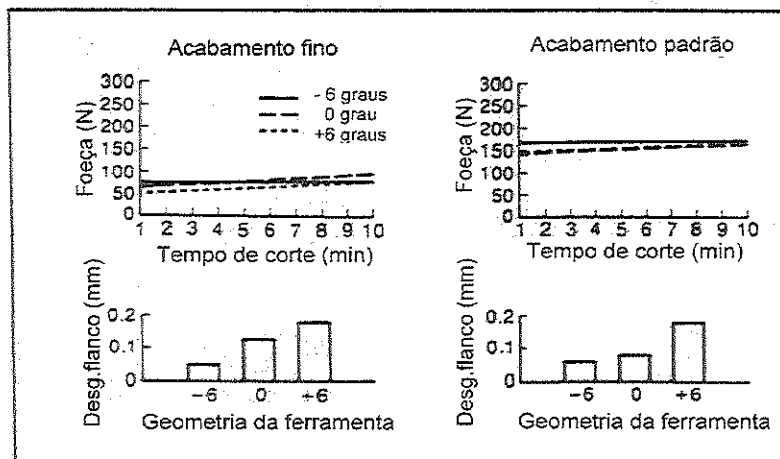


FIGURA 2.6 – EFEITO DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA FORÇA RADIAL E NO DESGASTE DE FLANCO USANDO UMA ARESTA DE CORTE CHANFRADA [15].

Como pode-se notar na figura 2.6, a ferramenta com geometria de corte negativa é a que apresenta os melhores resultados para ambos os casos, notando-se entretanto um aumento na força radial para as operações de acabamento padrão de um fator de 2.

2.2.2.4.2 - Influência do tratamento térmico no desgaste da ferramenta.

Outro fator que influencia o desgaste da ferramenta é o tipo de tratamento térmico utilizado na peça. Dependendo do tratamento, pode ser obtida uma estrutura bainítica ou martensítica no material a ser usinado. Embora a estrutura bainítica apresente dureza ligeiramente menor que a estrutura martensítica, o material bainítico apresentou piores resultados para a vida da ferramenta no corte a seco [12].

Quando comparou-se a usinagem das duas estruturas, a seco ou com emulsão, o material bainítico não apresentou diferenças significativas, entretanto o material martensítico atingiu o critério máximo para desgaste da ferramenta com a utilização de emulsão mais rápido que no processo a seco.

Na figura 2.7 a seguir pode-se observar os resultados citados acima, bem como notar-se a superioridade da ferramenta de PCBN sobre o composto cerâmico na usinagem de ambas as estruturas.

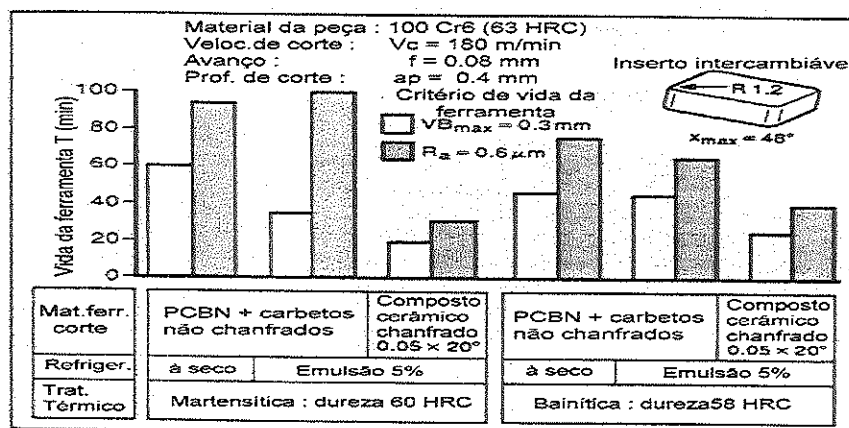


FIGURA 2.7 – TORNEAMENTO DO AÇO 100 CR6 COM VÁRIAS ESTRUTURAS ENDURECIDAS [12].

2.2.2.4.3 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta de PCBN

A velocidade de corte tem considerável influência sobre o comportamento das ferramentas de PCBN nos processos de usinagem de materiais endurecidos. Particularmente no caso em que o cavaco tem pequena seção transversal, dependendo da combinação ferramenta/material da peça, uma pequena velocidade de corte resultará em deformação plástica do material insuficiente, devido à menor temperatura gerada na zona de corte. Conseqüentemente, a vida da ferramenta e a qualidade superficial serão reduzidas. Já altas velocidades de corte causam problemas devido às altas temperaturas na zona de corte e à transformação da microestrutura na superfície da peça. Na figura 2.8 a seguir pode-se notar que a velocidade de aproximadamente 170 m/min é ideal para a usinagem do aço 100 Cr6 (62HRC) nas condições descritas [16/17].

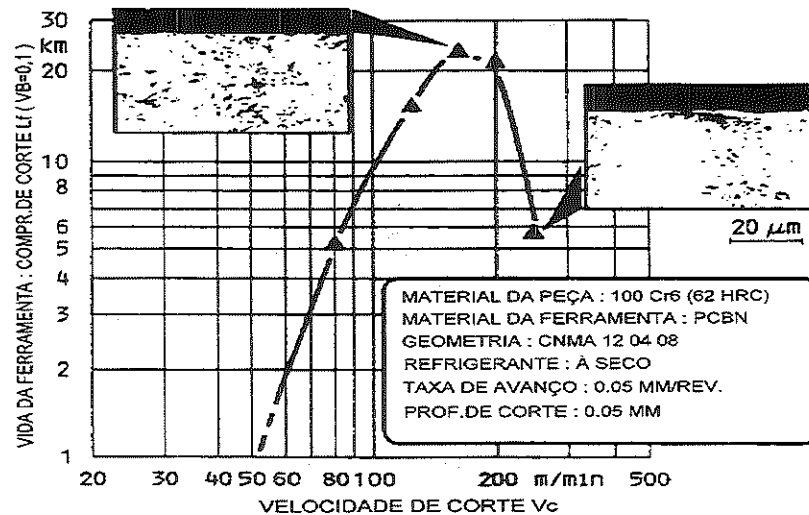


FIGURA 2.8 – VIDA DA FERRAMENTA DE PCBN COM LIGA CERÂMICA PARA OPERAÇÕES DE CORTE EM ACABAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS PARA ROLAMENTO [16].

É importante lembrar-se que a escolha das condições ótimas de usinagem não devem ser tomadas somente por critérios técnicos, mas também econômicos, pois os custos das ferramentas de PCBN são relativamente altos quando comparados aos compostos cerâmicos, seus concorrentes diretos.

2.2.3- Mudanças estruturais na superfície da peça

As altas temperaturas geradas no torneamento duro quando efetuado à seco, podem provocar danos à microestrutura da peça com um conseqüente endurecimento da sua camada mais superficial. Isto é inadmissível em componentes sujeitos a grandes tensões. Para evitar-se tal dano superficial, pode-se utilizar refrigerantes ou ferramentas de corte com arestas intactas (novas). Mesmo quando não se notam mudanças estruturais, tensões residuais podem ocorrer no "hard turning", podendo ser termicamente induzidas ou de compressão mecânicamente induzidas [12].

Não há uma clara correlação entre mudanças estruturais e tensões residuais induzidas. Entretanto, estudos relatam que as condições da aresta de corte das ferramentas têm efeito significativo tanto nas mudanças da estrutura do material quanto nas tensões residuais induzidas [12].

2.3 - RETIFICAÇÃO

Já há algum tempo a retificação não é mais considerada como apenas um processo secundário a ser utilizado após as operações de torneamento ou fresamento, com o objetivo de aumentar a precisão ou melhorar o acabamento superficial. Ao contrário, a retificação está emergindo como um processo primário de produção, e as razões-chaves para este sucesso incluem a aceitação das novas tecnologias como dressagem contínua, alta velocidade, retificação de mergulho “creep feed” e os novos rebolos de CBN, que em conjunto com outras tecnologias, proporcionam um melhor atendimento às indústrias. A retificação atende aos requisitos das usinagens de precisão, utilização de materiais mais exóticos tais como as ligas à base de níquel, além de atender também às pressões das agências ligadas ao meio ambiente, com o intuito de reduzir as emissões geradas nos processos de fabricação [18].

Pode-se dizer, portanto, que a pressão da indústria de produção, aliada a uma melhor tecnologia, estão impulsionando a retificação rumo ao século 21, seguindo basicamente as seguintes tendências[19].

•**Maior venda de equipamentos de retificação:** os usuários estão substituindo equipamentos antigos ou simplesmente comprando, pois a retificação agora pode fazer alguns serviços melhor do que a usinagem convencional, em função de ser mais rápida, mais precisa, mais fácil de usar e mais barata do que no passado;

- **Maior uso do CBN:** os fabricantes (de máquinas, ferramentas e usuários) estão aceitando as vantagens do CBN e aprendendo como usá-lo efetivamente;

- **Maior utilização de operações com CNC:** controles mais inteligentes, sistemas mais simples e a dificuldade de criar (e manter) mão-de-obra mais qualificada torna a retificação operada por CNC mais atrativa.

2.3.1- Retificação a alta velocidade

Desde que, na década de 20, se reconheceu que um aumento na velocidade do rebolo pode melhorar o desempenho do processo de retificação, contínuos esforços têm sido realizados com o objetivo de aumentar ainda mais esta velocidade. Na verdade, a velocidade é a chave para a remoção de altas taxas de material na retificação.

A literatura cita que velocidades de 60 m/s e até 100 m/s foram alcançadas já na década de 60. Atualmente o uso de abrasivos de CBN aplicados em um rebolo com cubo de material sólido permitem atingir velocidades de 150 m/s, 250 m/s (em aplicações especiais). Além disso, já foram executados testes com velocidade de até 500 m/s, graças à disponibilidade de rebolos apropriados (CBN) e à adaptação de uma retificadora para retificação a alta velocidade [20].

A utilização da alta velocidade de corte possibilita a remoção do material rapidamente, sem danos térmicos à peça, pois o aumento da velocidade provoca a diminuição do tamanho do cavaco e, conseqüentemente, menor força é necessária para cortá-lo, implicando pois menores cargas sobre os grãos abrasivos do rebolo. Cabe ainda ressaltar que grande parte do calor gerado é carregado para fora da peça através do cavaco. Portanto, o aumento das velocidades de corte proporciona melhores acabamentos superficiais, reduzidas taxas de desgaste e maior vida do rebolo, conforme se verifica na figura 2.9. Isto significa dizer que, no futuro, é possível que haja pesquisas envolvendo retificação a seco utilizando-se altas velocidades de corte.

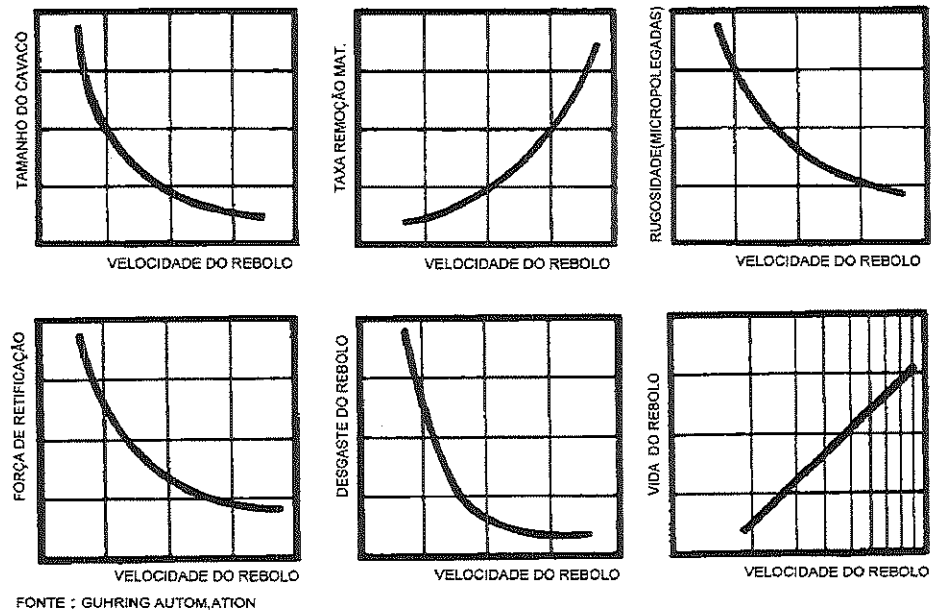


FIGURA 2.9 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE DO REBOLO SOBRE OS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO [21]

Hoje em dia já se verifica a tendência da substituição dos processos formais pela retificação a alta velocidade. Por exemplo, uma fabricação de virabrequins utilizava 4 tornos, 3 retificadoras, 4 transportadores e 5 operadores para produzir 125 virabrequins por hora. Hoje a fabricação da mesma peça é feita em 3 retificadoras cilíndricas-CNC projetadas para operar a alta velocidade, com possibilidade de retificação de vários diâmetros, em desbaste ou semi acabamento, numa simples passada, com taxa de remoção de material maior que no torneamento e sem necessidade de operação posterior de acabamento superficial em algumas superfícies. Em virtude desta eficiência, o aumento observado na produção foi de 44%, ou seja, 180 peças por hora [21].

Entretanto, para a utilização de retificação a alta velocidade de corte, faz-se necessária a adoção de alguns parâmetros, quais sejam :

- Alta rigidez estática e dinâmica da base da máquina, assim como adequada potência do fuso;

- Balanceamento adequado do rebolo para obter-se bom acabamento superficial, bem como maior vida;
- Equipamento seguro, com prevenção de falhas e limitadores, sistema monitorado para controle anti-colisão;
- Maiores velocidades da peça;
- Fechamento da área de retificação para proteção do operador.

Além destes parâmetros, devem ser considerados ainda fatores tais como as perdas em vazio, decorrentes principalmente de perdas elétricas e mecânicas do fuso, que em fusos de alta frequência têm eficiência de 0,7 e 0,8 respectivamente, e as perdas decorrentes da rotação do rebolo, devido ao atrito do rebolo com o ar e com o refrigerante, sendo que as perdas devido ao atrito rebolo/ar são significativas em altas velocidades, conforme verifica-se na figura 2.10.

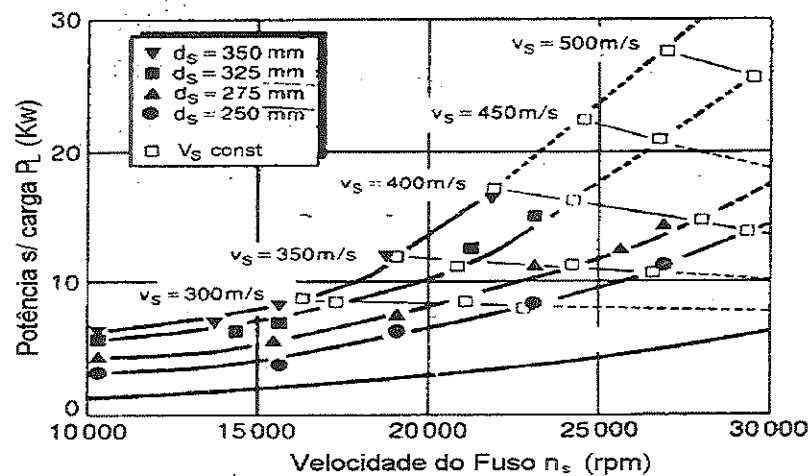


FIGURA 2.10 – PERDA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO REBOL E DA VELOCIDADE DE CORTE [20]

Da figura pode-se observar que um aumento no diâmetro do rebolo tem grande influência nas perdas, devido à zona de turbulência gerada pelo aumento da área em contato com o ar. Portanto, velocidades

periféricas do rebolo próximas à velocidade do som devem ser obtidas com o menor diâmetro de rebolo possível, a fim de minimizar a perda de potência devido ao atrito com o ar [20].

2.3.2 - A Refrigeração na Retificação

A utilização de um sistema de refrigeração eficiente é extremamente importante para o processo de retificação, principalmente quando se fala em altas velocidades de corte, a fim de manter-se a superfície retificada e o rebolo relativamente frios durante o processo. Um sistema adequado propicia ainda a remoção de pequenos cavacos do rebolo, melhorando as condições de corte e, conseqüentemente, evitando danos térmicos à peça e ao rebolo, o que aumenta a vida desses.

Os refrigerantes à base de água podem ser mais facilmente filtrados e reciclados, tornando assim a reciclagem do lodo produzido na retificação mais fácil. Isto é uma vantagem para os usuários de CBN, pois o lodo gerado pelos rebolos de óxido de alumínio combinado com o refrigerante é, em alguns casos, considerado tóxico [19].

A refrigeração é, portanto, um importante fator no processo, que deve ser explorado adequadamente, merecendo muito mais atenção por parte dos pesquisadores, pois não se sabe detalhadamente quão melhor seria o processo de retificação se um bom sistema de refrigeração fosse adotado.

2.3.3 - Sistemas de monitoramento na retificação

O processo de retificação é um dos mais utilizados na fabricação de componentes de precisão, principalmente como operação de acabamento, a fim de obter-se peças com melhor qualidade superficial e de tolerâncias mais apertadas. Contudo a retificação ainda apresenta muitos problemas devido ao seu comportamento instável, mesmo quando realizada em equipamentos com CNC, necessitando muitas vezes da presença de um operador experiente atuando junto à máquina.

A crescente demanda por custos reduzidos, aumento de qualidade e confiabilidade do processo impulsiona os processos a adotarem, cada vez mais, sistemas de automação. Neste contexto, são crescentes os estudos nesta área, em busca de sistemas de monitoramento voltados para a retificação (assim como para outros processos), que objetivam basicamente substituir a perícia humana nas correções necessárias durante o processo de usinagem, principalmente o controle dimensional da peça, auxiliando assim no nivelamento do desempenho de diferentes operadores ou até mesmo ter-se um único operador atuando no controle de vários equipamentos simultaneamente.

A este sistema, capaz de fazer uso de diversos sistemas de monitoramento e operar com um alto nível de informações para controlar o processo de forma automática e tomando decisões sobre ele com a mínima interferência do operador, dá-se o nome de Retificação Inteligente - RI, descrevendo-se a seguir alguns dos sistemas possíveis de serem monitorados :

2.3.3.1 - Sistema de Calibração Automática do Rebolo

Um dos sistemas já experimentado e posteriormente adotado pela indústria de máquinas ferramentas é o sistema de calibração [22], que utiliza a Energia Acústica - EA para detectar o contato entre o rebolo e o diamante de calibração, a fim de melhorar a exatidão dimensional da retificadora, diminuindo o erro sistemático das peças produzidas em lote. Este sistema possibilita diminuir a dispersão das peças retificadas, conforme verifica-se na figura 2.11 . Além disso, o sistema pode facilitar nas operações de "set up" da máquina, tornando-as mais rápidas, e na dressagem do rebolo, pois evita a dressagem em vazio devido ao desgaste excessivo do rebolo ou à deformação térmica da estrutura da máquina.

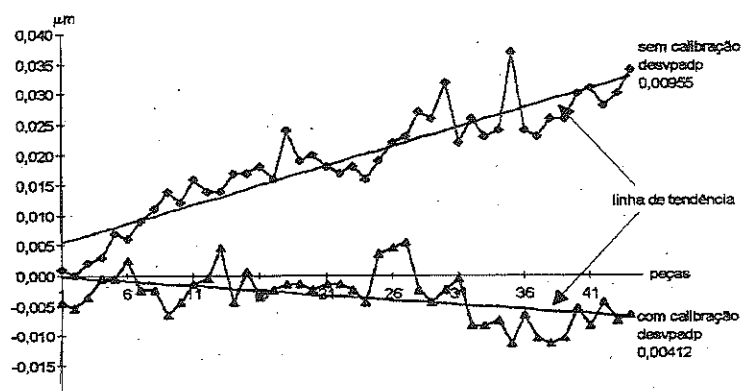


FIGURA 2.11 – DISPERSÃO DIMENSIONAL DAS PEÇAS RESULTANTES DE DOIS CICLOS DE RETIFICAÇÃO, COM E SEM CALIBRAÇÃO DO REBOLO [22].

2.3.3.2 - Dressagem Inteligente

Quando as peças retificadas começam a apresentar problemas de acabamento, erros de forma ou de tolerância, normalmente realiza-se a dressagem, a fim de corrigir a superfície do rebolo e devolver-lhe as características de afiação e o restabelecimento do perfil original [23].

Utilizando-se da informação sobre o posicionamento do rebolo obtida na calibração automática do rebolo, pode-se iniciar a dressagem inteligente [24], eliminando-se por exemplo a dressagem em vazio. Utiliza-se a emissão acústica para monitorar o processo, que é realizado em duas etapas, uma com alta profundidade de dressagem (aproximadamente 50 μm) e velocidade máxima ($ud = 1$) e a segunda passada com dressagem de acabamento.

A emissão acústica detecta se há falhas durante a operação de dressagem. Caso se detecte alguma falha, a operação é repetida automaticamente, até que não seja detectada nenhuma falha.

2.3.3.3 - Gap Less Rebolo/ Peça

Este sistema diminui o tempo de ciclo da operação de retificação utilizando-se da detecção de contato entre o rebolo e a peça através da emissão acústica. Desta forma, é feita uma aproximação rápida com o rebolo até uma posição limite (de segurança), conforme verifica-se na figura 2.12, diminuindo então a velocidade até que haja o contato rebolo/peça. A partir deste ponto o sistema altera a velocidade de avanço para mais ou para menos [25].

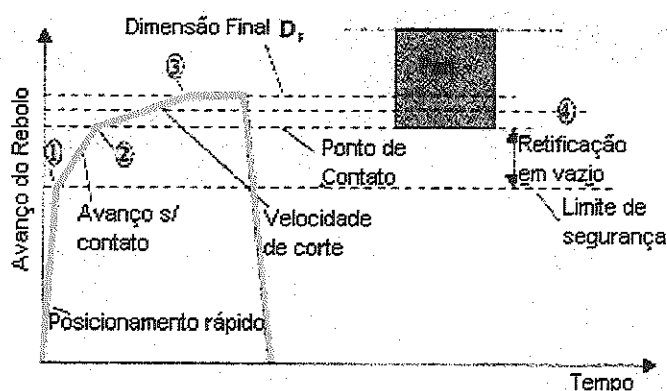


FIGURA 2.12 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM CICLO DE RETIFICAÇÃO COM DETECÇÃO DE CONTATO REBOLO/PEÇA [25]

O sistema permite também observar se há erros de fixação, presença de picos (por exemplo, uma peça excêntrica ou com sobremetal excessivo) ou ainda se há ausência da peça, podendo, neste caso, ser interpretado também como material com dimensões abaixo das mínimas necessárias para se realizar a retificação.

2.3.3.4 - Sistema anti-colisão

Neste sistema é feito um monitoramento durante a movimentação do rebolo para o posicionamento, a fim de se verificar se há a presença de emissão acústica, pois os ruídos provocados na movimentação do

rebolo ficam bem abaixo do nível de sinal obtido quando o rebolo toca a peça, o dressador ou o barramento da retificadora [25].

Desta forma, caso haja a presença de EA durante a movimentação, o sistema determinará, automaticamente, o desligamento e o afastamento do rebolo, sem maiores conseqüências para a máquina.

2.3.3.5 - Detecção de falhas no sobremetal

É feita através da observação de bruscas alterações no comportamento do sinal de EA em períodos específicos do ciclo, pois o contato rebolo/peça deve ser cada vez mais contínuo após o início da operação de retificação. Portanto, durante o centelhamento (também conhecido como “spark out”), que é a fase onde o rebolo apenas elimina as imperfeições da peça, sem arrancar material, o sinal de EA deve ser contínuo, ou seja, qualquer variação no sinal de EA pode significar a presença de falhas na peça, que deve ser eliminada, caso ainda haja sobremetal.

2.3.4 - Retificação com Alta Profundida de Corte - “Creep Feed”

Com o advento de novos materiais como as super ligas e cerâmicas utilizadas na fabricação de componentes mecânicos e a crescente demanda por maior produtividade e melhor qualidade, tem havido um constante progresso nos processos de usinagem, tanto em operações convencionais como na simplificação das seqüências de fabricação de um componente, substituindo-se operações intermediárias por operações de acabamento.

Neste contexto, o processo de retificação tem sido muito utilizado em operações de desbaste e acabamento simultâneos, substituindo operações intermediárias como torneamento e fresamento, o que possibilita uma redução do número de máquinas, mão de obra e otimização do processo. Estas operações são realizadas com altas profundidades de corte, podendo remover-se dezenas de milímetros numa única passada. São conhecidas como Retificação “Creep Feed”,

tendo o seu desenvolvimento se iniciado na década de 70, em virtude da necessidade das indústrias aeroespaciais de usinar superligas de níquel e cromo ou materiais cerâmicos, devido às altas durezas apresentadas. Desde então, muitas pesquisas têm sido feitas com este processo e muitos avanços foram obtidos, sendo crescente a sua utilização pela indústria na atualidade [26].

É importante, portanto, conhecer-se um pouco das principais características e vantagens deste processo, conforme segue:

2.3.4.1-Retificação com direção de corte Concordante/Discordante

Quando a direção de corte é a mesma do movimento da mesa (ou de rotação da peça), chama-se de direção de corte concordante, e quando é oposta chama-se de direção de corte discordante. Na retificação Creep Feed é importante determinar-se qual direção deve ser adotada, pois esta influencia no processo conforme a situação de corte empregada da seguinte maneira :

- **Corte Concordante** : tem maiores taxas de remoção de material sem queima da peça, porém cavacos retirados se alojam no rebolo por todo o arco de corte.

- **Corte Discordante** : proporciona melhor acabamento nas peças, além de propiciar melhor atuação do refrigerante, pois este entra em contato com a peça diretamente no ponto de acabamento do corte discordante.

Portanto, é recomendável utilizarem-se rebolos com alta porosidade ou efetuar a operação em duas passadas, fazendo-se o desbaste com corte concordante e o acabamento com corte discordante.

2.3.4.2 - Refrigeração em Creep Feed

Como nas demais operações de retificação, na retificação Creep Feed a refrigeração é crucial para dissipar o calor gerado, pois a geração de calor é muito elevada devido ao comprimento do arco de corte, com maior número de arestas de corte em contato com a peça.



Convém salientar que a utilização de um rebolo poroso facilita tanto na penetração do refrigerante na área de contato quanto na remoção do cavaco, proporcionando melhor acabamento superficial e menor risco de provocar danos térmicos à peça (queima).

Outro ponto a se comentar é que, nos diversos experimentos relatados, a água apresentou maior capacidade de remoção de calor que o óleo. Contudo, o óleo apresenta maior capacidade de lubrificação, e é indicado na obtenção de peças de pequeno raio e quando se deseja uma rugosidade Ra menor (até 50% menor do que com água).

2.3.4.3 - Rebolos para retificação creep feed

Um dos aspectos principais a serem considerados na fabricação de rebolos para a retificação creep feed é a capacidade do rebolo em dissipar o calor produzido no arco de corte. Este é o motivo pelo qual é importante a utilização de rebolos com porosidade induzida, que permitem a infiltração do líquido refrigerante através dos poros, o que auxilia na dissipação do calor gerado e na remoção dos cavacos, além de manter a zona de corte mais fria, evitando assim danos térmicos ao rebolo (desgaste) e à peça (queima).

Os rebolos superabrasivos (CBN e Diamante) e os rebolos que contêm enxofre ou níquel são boas opções para a retificação Creep Feed. Os rebolos de CBN revestidos com níquel são excelentes para retificação Creep Feed de perfis, com boa retenção de formato e acuracidade. Os grãos de CBN são considerados os ideais para a retificação creep feed, devido às suas características de agressividade e baixo nível de desgaste, o que lhes proporciona boa estabilidade.

2.3.4.4 - Dressagem contínua

A retificação creep feed com dressagem contínua, chamada CDCFG (do inglês "Continuous Dressing Creep Feed Grinding") é o processo de retificação creep feed mais rápido existente, apropriado para componentes fabricados com materiais de usinabilidade extremamente

baixa e que agem agressivamente sobre o rebolo e para componentes muito extensos.

As principais limitações para a sua utilização são os custos de produção dos rolos diamantados, longos tempos de troca da ferramenta (devido à instalação) e investimentos iniciais elevados, pois as máquinas têm de ter sistema de dressagem para rolo dressador, CNC para monitorar o avanço do dressador e potência alta.

2.3.4.5 - Equipamentos para retificação creep feed

Da mesma maneira que na retificação a alta velocidade de corte, os equipamentos para retificação creep feed devem ter uma boa rigidez no sistema (de avanço, na estrutura, na mesa, na coluna, no fuso do rebolo etc), devido às altas forças radiais envolvidas no processo.

Deve dispor de um sistema de avanço que permita avanços constantes com baixas velocidades de avanço e livre de vibrações para operações com altas profundidades de corte.

O sistema da mesa (hidráulica e eletromecânica para retificação creep feed) deve ter acionamento por rosca de esferas, que dá maior precisão ao avanço.

Pode-se dizer que, apesar de a retificação creep feed ter sido desenvolvida objetivando principalmente a usinagem de materiais de dureza elevada, que não poderiam ser torneados, fresados ou brochados a um custo economicamente viável, atualmente este processo é cada vez mais aceito no meio industrial para materiais comuns (aço ferramenta e aço rápido), pois elimina operações e, conseqüentemente, reduz os custos de produção.

2.3.5 Integridade superficial da peça devido ao abrasivo

Conforme já mencionado anteriormente, a retificação é, em muitos casos, uma das últimas operações de usinagem na fabricação de um componente. Portanto, é bastante razoável olhar-se primeiro para o

processo de retificação quando se analisa a influência da usinagem sobre o comportamento funcional de uma peça usinada.

Hoje em dia, há duas tendências óbvias na tecnologia de retificação, que são altas taxas de remoção de material e crescente demanda por melhor qualidade das peças. Isto significa que, ao analisarmos a produção de uma peça, devemos levar em conta, além dos aspectos geométricos, também a integridade superficial da superfície usinada, pois ela tem forte influência no comportamento funcional de componentes altamente tensionados.

A integridade superficial, que inclui a tensão residual e mudanças na dureza e estrutura da camada abaixo da superfície usinada, são influenciadas pelo processo de retificação. As mudanças de dureza e estrutura, tais como queima, são normalmente visíveis. Entretanto, as tensões residuais dão uma indicação mais precisa sobre o progresso do processo de retificação [27].

Na figura 2.13 é mostrada uma comparação entre rebolos de Al_2O_3 e CBN (ambos com liga vitrificada). São traçados as tensões residuais em função da velocidade de corte, taxa de remoção de material e refrigeração com emulsão e com óleo.

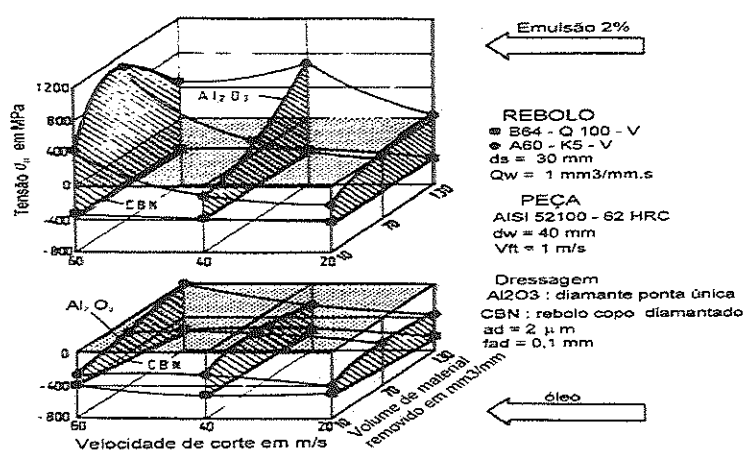


FIGURA 2.13 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE E DO REFRIGERANTE NAS TENSÕES RESIDUAIS DEPOIS DA RETIFICAÇÃO COM DIFERENTES ABRASIVOS[27].

Da figura observa-se que o processo com rebolo de CBN, utilizando refrigeração com óleo e emulsão, produz apenas tensões residuais de compressão. Já o rebolo de Al_2O_3 apresenta um resultado ligeiramente melhor somente com óleo, pois ao utilizar-se a emulsão como refrigerante nota-se o surgimento de tensões residuais de tração, que não são recomendadas para componentes sujeitos a altas tensões, como mancais de rolamento ou lâminas de turbina.

2.4 -Torneamento x Retificação

Componentes de aço altamente exigidos, como engrenagens e peças de mancal de rolamento, necessitam de tratamento térmico para aumentar sua resistência ao desgaste. Atualmente, a maioria dos processos de acabamento ainda são realizados através da retificação.

Com o desenvolvimento de ferramentas de corte de materiais super duros e com arestas de corte geometricamente definidas na última década (PCBN e cerâmicas), surgiu a possibilidade de usinagem de materiais endurecidos, conhecido como "hard machining", podendo ser executado através do torneamento, fresamento etc. Esta nova tecnologia apresenta claras vantagens sobre a retificação em termos de flexibilidade e um sistema de produção mais de acordo com o meio ambiente (pode executar usinagens à seco), com grande potencial para aumentar a produtividade e a competitividade.

Entretanto, apesar das citadas vantagens desta tecnologia, seu uso industrial é ainda baixo, se comparado ao seu potencial de aplicação. O motivo para isto é que esta nova tecnologia ainda não foi suficientemente estudada quanto ao comportamento das superfícies usinadas (Integridade Superficial), bem como quanto à acuracidade dimensional e de forma alcançável por estes processos.

Diversos estudos já foram realizados por diversos pesquisadores, com o intuito de conhecer-se melhor o comportamento de alguns processos

de usinagem de materiais endurecidos quanto aos parâmetros acima citados. A seguir serão apresentados alguns resultados quanto aos parâmetros citados anteriormente, assim como algumas considerações sobre os processos em referência quanto à capacidade de remoção de material, custos de produção, geração de resíduos, estabilidade do processo e custos dos equipamentos

2.4.1 - Mudanças nas propriedades Físicas das superfícies das Peças

É de conhecimento público que a usinagem de materiais endurecidos pode provocar o aparecimento das chamadas “camadas brancas”, do inglês “white layers”, conhecidas na retificação como queimas [16]

O surgimento destas camadas ou mesmo uma ligeira mudança estrutural na camada externa da peça pode causar danos às engrenagens ou componentes de rolamentos.

Estas mudanças nas propriedades físicas são em parte devido às tensões mecânicas e em parte devido às altas temperaturas alcançadas durante o processo. Na figura 2.14 podemos observar uma distribuição hipotética de tensões na aresta de corte.

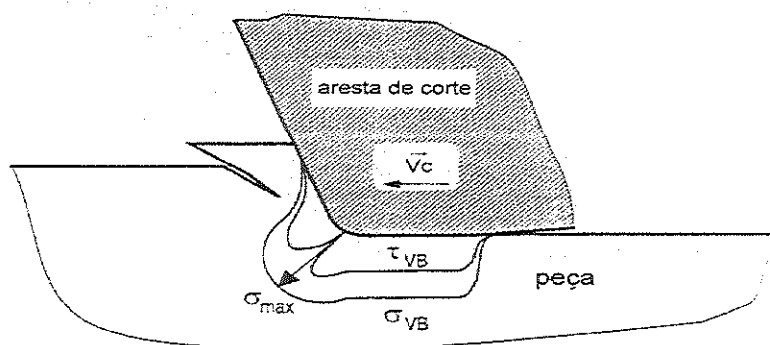


FIGURA 2.14 – FIGURA HIPOTÉTICA DAS DISTRIBUIÇÕES DAS TENSÕES NA SUPERFÍCIE DA PEÇA[16]

Segundo König [16], as tensões σ_{VB} permanecem aproximadamente constante na área de contato peça/ferramenta, alcançando um valor aproximado de 4.000 N/mm^2 quando se usina o aço endurecido 100 Cr6.

A figura 2.15 mostra o resultado do cálculo que é baseado na proposição de que 80% do calor gerado devido ao atrito flui para a peça.

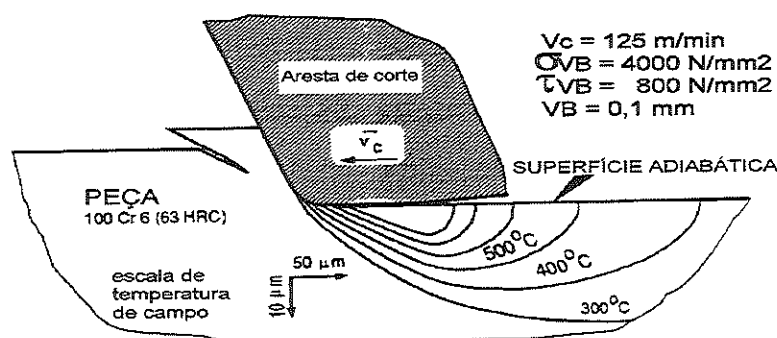


FIGURA 2.15 – ESTIMATIVA DE TEMPERATURA DE CAMPO DEVIDO AO ATRITO NA FACE DE FLANCO [16]

As altas temperaturas geradas pelo atrito não penetram profundamente na peça. Quando estas temperaturas excedem a temperatura de transição γ - α , desenvolve-se a martensita produzida pelo atrito, conhecida como camadas brancas ou “white layers” em micrografia, e temperaturas mais baixas podem causar um recozimento do material. Estas mudanças, devido ao atrito, provocam o aparecimento de tensões residuais de tração, que se sobrepõem às tensões residuais de compressão, resultantes da compressão mecânica.

Na retificação também ocorrem mudanças nas propriedades físicas nas superfícies dos materiais usinados, em virtude das altas temperaturas e pressões na zona de interação entre os grãos e o material da peça, sendo influenciadas basicamente pelas condições de usinagem, topografia do rebolo, rebolo utilizado e pelas condições de refrigeração.

O comportamento devido ao tipo de refrigerante e rebolo já foi mostrado na figura 2.13 [27], com clara vantagem para os rebolos de CBN e, no caso dos rebolos de Al_2O_3 , melhores resultados ocorreram quando refrigerado com óleo (maior poder de lubrificação), pois tensões residuais de compressão foram obtidas.

A retificação conta com vários métodos para melhorar as condições de tensão residual das superfícies usinadas. A maioria destes métodos são operações de acabamento, que deformam o material plasticamente, com pouca ou nenhuma remoção de material. O centelhamento, também conhecido como “spark out”, é uma destas operações, e sua utilização propicia um relaxamento nas tensões residuais [28]

A utilização de rebolos de CBN produz basicamente superfícies com tensões residuais de compressão, sendo que um aumento na concentração de CBN no rebolo gera uma tendência às tensões residuais de compressão na superfície usinada.[28], conforme verifica-se na figura 2.16 .

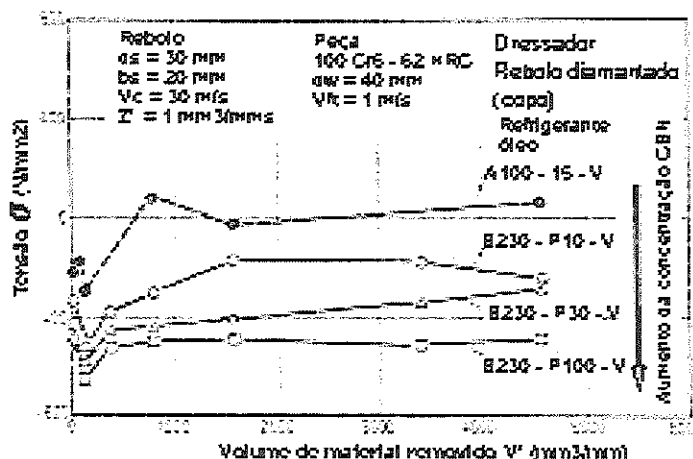


FIGURA 2.16 – TENSÕES RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CBN NO REBOLO [28]

2.4.2 - Nível de Precisão Alcançável no Torneamento e na Retificação

Além das incertezas quanto às propriedades das superfícies usinadas, tolerâncias de dimensões e de forma muito apertadas e

exigências de uma boa qualidade superficial têm freqüentemente representado um obstáculo à utilização da tecnologia do “hard turning” pela indústria.

Pode-se considerar que, utilizando-se os atuais tornos de precisão disponíveis (CNC), o máximo nível de qualidade alcançável com o torneamento será a qualidade IT6, com qualidade superficial R_{tm} 2-3 μm , considerada como uma qualidade simples de se obter na retificação.

Estes níveis de acuracidade são considerados insuficientes para permitir ao “hard turning” substituir a retificação em muitas operações de precisão.

Além disso, os tornos de precisão CNC convencionais não são capazes de substituir as operações de retificação de precisão, devido à insuficiente acuracidade das máquinas. No “hard turning”, ao contrário do processo convencional, o maior componente de força é efetivo na direção da força passiva, e não em direção à força de corte. Portanto o projeto de um torno de precisão, em termos de mais alta rigidez, deve ser mais comparável ao de uma retificadora, ou seja, tem um alto custo.

As forças de corte envolvidas no torneamento de aços endurecidos são no mínimo 100 vezes superior àquelas encontradas nas usinagens de ultra precisão de materiais não ferrosos. Assim, os projetos de tornos de precisão para este tipo de usinagem devem ter um maior grau de rigidez do que aquele utilizado nos tornos de ultra precisão, normalmente equipados com mancais aerostáticos e guias deslizantes.

A figura 2.17 mostra uma comparação das superfícies possíveis de serem obtidas levando-se em conta diversos fatores como material da peça, material da ferramenta e opção tecnológica disponível.

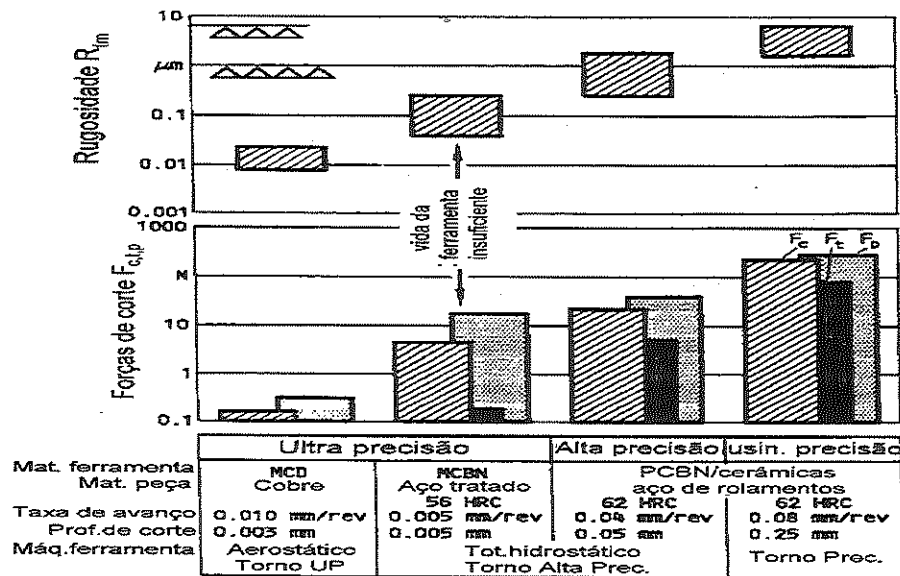


FIGURA 2.17 – COMPARAÇÃO DAS QUALIDADES DE SUPERFÍCIES E FORÇAS DE CORTE PARA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS NÃO FERROSOS E TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO [16]

2.4.3 – Capacidade de Remoção de Material

Um outro fator a ser considerado na comparação entre os dois processos é quanto à capacidade de remoção de material (Q_w). Seguramente o torneamento é mais eficiente, sendo possível remover-se sobremetal na faixa de milímetros com boa acuracidade, graças à disponibilidade de ferramentas de PCBN e cerâmica e aos equipamentos existentes hoje. Já a retificação tem suas limitações quando se utiliza de rebolos e equipamentos convencionais (rebolos de óxido de alumínio e retificadoras CNC de mercado). A eficiência do processo de retificação melhora quando se utiliza de rebolos de CBN e equipamentos que permitam altas velocidades de corte.

2.4.4 – Custo de Produção

O custo de produção varia conforme as condições de usinagem empregadas. Dependendo do sobremetal a ser removido, pode-se ter vantagens ora para o torneamento ora para a retificação cilíndrica de mergulho, uma vez que o tempo de corte no torneamento independe da

profundidade de corte utilizada, mas sim da velocidade de corte, do avanço e do comprimento de corte. Neste contexto, para pequenos valores de sobremetal e comprimento de corte possíveis de serem usinados em operação de retificação de mergulho (largura da área retificada \leq à largura do rebolo), é possível ter-se um tempo de corte na operação de retificação menor que no torneamento, tornando este processo mais viável economicamente, caso este seja o único fator limitante. Além disso, o torneamento é mais flexível do que o processo de retificação, pois com um simples set up é possível usinar-se várias peças de diferentes formatos e diâmetros, enquanto que na retificação já é necessária a utilização de vários rebolos, de diâmetros diferentes, quando se quer retificar uma peça escalonada, o que aumenta o tempo de preparo, de dressagem e, conseqüentemente, os custos de fabricação.

2.4.5 – Resíduos

A geração de resíduos é um dos grandes problemas no processo de retificação, pois é uma operação que não é possível de ser realizada à seco com os rebolos e equipamentos existentes na atualidade. Devido à necessidade de utilizar-se emulsões ou óleos no processo, há a ocorrência de uma névoa em suspensão no ambiente de fabricação, que é altamente prejudicial à saúde dos empregados, além de produzir um cavaco difícil de se separar (conhecido como lodo), o que cria dificuldades às empresas para se desfazerem destes resíduos.

Já o torneamento de materiais endurecidos pode ser realizado à seco, produzindo um cavaco limpo, que é facilmente reciclado, o que pode ser considerado como uma grande vantagem, pois atualmente o meio ambiente está cada dia mais valorizado.

2.4.6 – Estabilidade do processo

O processo de retificação é normalmente bastante estável. Entretanto, quando ocorre algum problema no processo é mais difícil de se resolver, devido às inúmeras variáveis que podem influenciar no processo.

Já o torneamento pode apresentar picos na dimensão da peça durante o processo (é mais instável), necessitando pois um monitoramento maior sobre o mesmo. Entretanto, a ocorrência de problemas durante o processo são mais fáceis de serem solucionadas.

2.4.7 – Custo dos Equipamentos

Outro fator que pode influenciar bastante quanto a qual dos processos utilizar refere-se ao custo dos equipamentos, uma vez que as retificadoras CNC têm um custo que é de duas a três vezes maior que o custo de um torno CNC. Isto pode ser um fator determinante numa tomada de decisão, pois com a disponibilidade de ferramentas de PCBN e cerâmicas e a possibilidade de usinagem de materiais endurecidos o processo se torna altamente competitivo, além de possuir maior flexibilidade que o processo de retificação.

Portanto, para definir-se qual processo é o mais indicado para produzir determinado componente é recomendável estudar-se os diversos parâmetros citados, quais sejam : qualidade dimensional e de forma, custo de produção e integridade superficial da superfície usinada etc, pois conforme verificou-se , o torneamento e a retificação tendem a, cada dia mais, competirem entre si, a fim de abocanhar maiores faixas de mercado dentro da indústria metal-mecânica.

3- METODOLOGIA COMPARATIVA PARA A ESCOLHA ENTRE OS PROCESSOS DE TORNEAMENTO E RETIFICAÇÃO.

Conforme verificou-se anteriormente, a retificação e o torneamento concorrem entre si em algumas faixas de atuação, tornando-se difícil a decisão sobre qual dos dois processos é o ideal para a produção de determinadas peças. Desta forma, é importante determinar-se uma metodologia comparativa entre os dois processos, a fim de orientar os usuários destes numa tomada de decisão. Neste trabalho será estabelecido como elemento de análise o sobremetal de usinagem.

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.

3.1 – Torneamento

Da literatura [29] tem-se para uma operação de torneamento o tempo total de confecção por peça igual a:

$$t_n = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t * t_{ft}}{Z} \quad [min] \quad (3.1)$$

onde:

t_{tt} = Tempo total de confecção por peça por torneamento [min]

t_c = Tempo de corte [min]

t_s = Tempo secundário (colocação e retirada da peça) [min]

t_a = Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta [min]

t_p = Tempo de preparo da máquina [min]

t_{ft} = Tempo de troca da ferramenta [min]

n_t = número de trocas da ferramenta para um lote Z

Z = lote de peças produzidas

Pode-se escrever ainda para uma operação de torneamento externo com diâmetro constante :

$$n_t = Z * \frac{t_c}{T} - 1 \quad (3.2)$$

$$t_c = \frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} \quad [\text{min}] \quad (3.3)$$

$$T = \frac{K}{v^x} \quad [\text{min}] \quad (3.4)$$

onde:

T = vida da ferramenta [min]

b_w = comprimento de corte ou largura da peça [mm]

d = diâmetro da peça [mm]

f = avanço da ferramenta [mm/volta]

v_c = velocidade de corte [m/min]

K, x = respectivamente, a constante e o expoente da equação de Taylor para uma determinada operação com material da peça e ferramenta determinados.

Substituindo-se 3.2, 3.3 e 3.4 em 3.1 tem-se:

$$t_{tt} = \frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left[\frac{b_w * \pi * d * v^{x-1}}{1000 * f * K} \right] * t_{ft} \text{ [min]} \quad (3.5)$$

O tempo total será mínimo quando a função $\frac{\partial t}{\partial v} = 0$ e portanto encontra-se a velocidade de corte $v_{m\text{xp}}$ ($v_{m\text{xp}}$ =velocidade de máxima produção).

A velocidade de máxima produção pode ser calculada pela seguinte equação:

$$v_{m\text{xp}} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) * t_{ft}}} \text{ [m/min]} \quad (3.6)$$

É possível calcular também o tempo de vida da ferramenta para máxima produção através da equação:

$$T_{m\text{xp}} = (x-1) * t_{ft} \quad \text{[min]} \quad (3.7)$$

É importante lembrar que o aumento da velocidade de corte " v_c " e do avanço " f " diminuem o tempo de usinagem e de máquina, reduzindo conseqüentemente os custos de fabricação devido à máquina. Entretanto, estas alterações provocarão uma diminuição na vida da ferramenta, com aumento dos custos devido a esta.

Para os estudos em questão, pode-se considerar apenas os tempos de corte e aproximação envolvidos nos dois processos. A fim de estabelecer-se uma metodologia comparativa entre estes, considera-se que as peças são possíveis de serem executadas por ambos os processos na faixa de qualidade considerada – IT8.

Desta forma tem-se o tempo total de torneamento simplificado para comparação com a retificação conforme equação a seguir:

$$t_t = t_c + t_a + t_s \quad \text{[min]} \quad (3.8)$$

sendo:

$$t_c = \frac{b_w}{f * n} \quad (3.9) \quad \text{ou} \quad t_c = \frac{bw * \pi * d}{1000 * f * v} \quad [\text{min}] \quad (3.10)$$

substituindo-se 3.10 em 3.8 tem-se:

$$t_t = \frac{bw * \pi * d}{1000 * f * v} + t_a + t_s \quad [\text{min}] \quad (3.11)$$

t_a = tempo de aproximação + tempo de afastamento

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

3.2 – Retificação

Considera-se neste estudo a operação de retificação em mergulho. Para este tipo de operação tem-se o tempo de retificação calculado pela seguinte fórmula :

$$t_{tr} = t_c + t_a + t_s + \frac{t_d}{PPd} + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_R * T_{IR}}{Z} \quad [\text{min}] \quad (3.12)$$

onde:

t_{tr} = tempo total de retificação [min]

t_c = tempo de corte [min]

t_a = tempo de aproximação e de afastamento [min]

t_s = tempo secundário (colocação e retirada da peça) [min]

t_p = tempo de preparo da máquina [min]

Z = lote de peças fabricadas

t_d = tempo de dressagem [min]

PPd = número de peças por dressagem

n_R = número de trocas do rebolo

T_{IR} = tempo de troca do rebolo [min]

O tempo de dressagem pode ser calculado por:

$$t_d = \frac{a_{dr} * n_{sr}}{b_s} \quad [\text{min}] \quad (3.13)$$

onde :

a_{dr} = avanço de dressagem [mm/volta]

n_{sr} = rotação do rebolo [rpm]

b_s = largura do rebolo [mm]

O número de peças por dressagem pode variar em função da agressividade da operação, isto é, quanto maior a quantidade de sobremetal usinado, menor será o número de peças obtidas por dressagem. A quantidade de peças por dressagem PPd pode ser obtida pela relação volumétrica definida através do parâmetro G. Substituindo os volumes de rebolo e de peça no conceito de G, simplificando-se e isolando-se o número de peças por dressagem PPd, tem-se :

$$PPd = \frac{4 * a_d * d_s * G}{(d_i^2 - d_f^2)} \quad (3.14) \quad \text{e} \quad G = \frac{V'_w}{V'_s} \quad (3.15)$$

onde :

a_d = profundidade de dressagem [mm]

d_s = diâmetro do rebolo [mm]

G = relação entre volume de material usinado e volume de rebolo desgastado

d_i = diâmetro inicial da peça [mm]

d_f = diâmetro final da peça [mm]

V'_w = volume de cavaco removido por unidade de tempo [mm³/mm]

V'_s = volume de rebolo desgastado [mm³/mm]

Agrupando-se os termos $t_c + t_a + t_s = t_R$ (tempo parcial de retificação)(3.16) é possível analisar-se o tempo de retificação em função da largura da peça, conforme verifica-se a seguir:

3.2.1- Comprimento de corte da peça é igual ou menor à largura efetiva de corte do rebolo

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

onde AproxIN [bw/bse] = aproximação do próximo inteiro

Tem-se de 3.16 que $t_R = t_c + t_a + t_s$

O tempo de corte t_c é dado por :

$$t_c = t_{merg} + t_{so} \quad [\text{min}] \quad (3.17)$$

e o tempo de mergulho t_{merg} é dado por:

$$t_{merg} = \frac{(d_i - d_f)}{F} \quad [\text{min}] \quad (3.18)$$

onde :

t_{so} = tempo de "sparkout" ou centelhamento, sem remoção de material, em min.

d_i = diâmetro inicial da peça [mm]

d_f = diâmetro final da peça [mm]

F = velocidade de avanço do rebolo no diâmetro [mm/min]

Portanto pode-se calcular o tempo parcial de retificação t_R pela seguinte equação :

$$t_R = \frac{(d_i - d_f)}{F} + t_a + t_s + t_{so} \quad [\text{min}] \quad (3.19)$$

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

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

onde $\text{AproxIN} [b_w/b_{se}] > 1$ = 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_{rep} e o tempo de sparkout dentro do tempo de corte.

Desta forma, tem-se para este caso :

$$t_R = \left\{ \left[t_a + t_{so} + t_{rep} + \frac{(d_i - d_f)}{F} \right] * \text{AproxIN} \left[\frac{b_w}{b_{se}} \right] \right\} + t_s \quad [\text{min}] \quad (3.20)$$

$$t_{rep} = \frac{b_{se}}{F_b} \text{ [min]} \quad (3.21) \quad \text{e} \quad t_a = \frac{d_{ap}}{F_{ap}} + \frac{d_{af}}{F_{af}} \text{ [min]} \quad (3.22)$$

onde:

t_{rep} = tempo de reposicionamento do rebolo para o corte [min]

b_w = largura da peça ou comprimento de corte [mm]

b_{se} = largura de corte efetiva do rebolo [mm]

F_b = velocidade de reposicionamento do rebolo [mm/min]

d_{ap} = distância de aproximação rebolo/peça [mm]

F_{ap} = velocidade de aproximação do rebolo [mm/min]

d_{af} = distância de afastamento do rebolo/peça [mm]

F_{af} = velocidade de afastamento do rebolo [mm/min]

A largura efetiva de corte do rebolo pode ser calculada pela fórmula a seguir :

$$b_{se} = b_s - I_{ov} * b_s = b_s * (1 - I_{ov}) \text{ [mm]} \quad (3.23)$$

ou

$$b_{se} = b_s - S_{ov} \text{ [mm]} \quad (3.24)$$

onde :

b_s = largura do rebolo [mm]

I_{ov} = sobreposição do rebolo, quando dada em percentual da largura deste. [%]

S_{ov} = sobreposição do rebolo [mm]

A figura 3.1 a seguir apresenta esquematicamente o corte para $b_w > b_{se}$.

Desta forma, obtêm-se as equações do sobremetal limite para os dois casos citados acima, a saber:

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

$$\text{de 3.19} \quad t_R = \frac{(d_i - d_f)}{F} + t_a + t_s + t_{so} = \frac{S_m}{F} + t_a + t_s + t_{so}$$

$$\text{de 3.11} \quad t_t = \frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} + t_a + t_s$$

Igualando-se 3.11 com 3.19 tem-se:

$$\frac{S_m}{F} + t_a + t_s + t_{so} = \frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} + t_a + t_s \quad (3.25)$$

Supondo-se que os tempos t_a e t_s para o torneamento e retificação são praticamente os mesmos tem-se:

$$S_{m \text{ lim}} = F \left(\frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} - t_{so} \right) \quad [\text{mm}] \quad (3.26)$$

onde $S_{m \text{ lim}} =$ sobremetal limite

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

$$\text{De 3.20} \quad t_R = \left\{ t_a + t_{so} + t_{rep} + \frac{(d_i - d_f)}{F} \right\} * \text{AproxIN} \left[\frac{b_w}{b_{se}} \right] + t_s$$

Igualando-se 3.20 com 3.11 tem-se:

$$\left\{ t_a + t_{so} + t_{rep} + \frac{(d_i - d_f)}{F} \right\} * \text{AproxIN} \left[\frac{b_w}{b_{se}} \right] + t_s = \frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} + t_a + t_s$$

(3.27)

Supondo-se que o tempo de colocação e retirada da peça t_s seja aproximadamente o mesmo para o torneamento e para a retificação e considerando-se $d_i - d_f = S_{m \text{ lim}}$, tem-se:

$$S_{m \text{ lim}} = F \left[\frac{1}{\text{AproxIN} [b_w / b_{se}]} * \left(\frac{b_w * \pi * d}{1000 * f * v} + t_a \right) - (t_a + t_{so} + t_{rep}) \right] \quad [\text{mm}]$$

(3.28)



É importante que algumas grandezas citadas acima (da retificação e do torneamento) sejam definidas experimentalmente, a fim de descobrir-se quais são os seus valores ideais a serem adotados. Algumas delas têm grande influência sobre o desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, sobre a qualidade final do produto e custos de fabricação. Estas são :

a) Na retificação

T_d = tempo de dressagem [min]

P_{Pd} = número de peças por dressagem

t_{so} = tempo de centelhamento ou sparkout [min]

F = velocidade de avanço do rebolo em mm/min

b) No torneamento

v_c = velocidade de corte [m/min]

f = avanço da peça [mm/volta]

3.4 – Custos de produção

Tem-se da literatura [29] o custo de produção por peça dado por :

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + K_{us} + K_{ui} + K_{um} + K_{uf} + (K_{eq} + K_{if} + K_v) \quad [\text{R\$}] \quad (3.29)$$

Onde :

K_p = custo de produção por peça [R\$]

K_m = custo de matéria-prima [R\$]

K_{mi} = custo indireto de matéria-prima [R\$]

K_{us} = custo de mão-de-obra (ou salário) de usinagem [R\$]

K_{ui} = custo indireto de usinagem [R\$]

K_{uf} = custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação)[R\$]

K_{um} = custo da máquina (juros, depr.,manut.,espaço ocupado, energia consumida) [R\$]

K_{eq} = custo de controle de qualidade [R\$]

K_{if} = custo indireto de fabricação (independe das condições de usinagem) [R\$]

K_v = custo proporcional às variações de custo de operações anteriores/posteriores (positivo ou negativo) [R\$]

Dos custos apresentados acima, somente três dependem do tempo de usinagem, que são:

K_{us} = custo de mão-de-obra

K_{um} = custo da máquina

K_{uf} = custo das ferramentas

3.4.1- Custo da mão-de-obra por peça K_{us}

Este custo é calculado pela seguinte equação:

$$K_{us} = t_t * \frac{Sh}{60} [R\$] \quad (3.30)$$

onde :

t_t = tempo total de confecção por peça [min]

Sh = salário mais sobretaxas [R\$/h]

3.4.2 – Custo máquina por peça (com depreciação linear)

É calculado por:

$$K_{um} = \frac{t_t}{H * 60} \left[(V_{mi} - V_{mi} \frac{m}{M}) * j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{me} + E_m * K_e * j \right] [R\$] \quad (3.31)$$

ou
$$K_{um} = \frac{t_t}{60} * S_m [R\$] \quad (3.32)$$

onde:

t_t = tempo total de confecção por peça [min]

V_{mi} = valor inicial de aquisição da máquina. [R\$]

m = idade da máquina [anos].

M = vida prevista para a máquina, [anos].

j = taxa de juros anual. [%]

K_{me} = custo anual de conservação da máquina [R\$/ano]

E_m = espaço ocupado pela máquina [m³]

K_e = custo do m³ ocupado pela máquina [R\$/ano]

S_m = custo total da máquina [R\$/hora]

H = número de horas de trabalho por ano (aproximadamente 2400h)

3.4.3 – Custo de ferramenta por peça

As equações apresentadas anteriormente podem ser utilizadas tanto para o processo de retificação quanto para o processo de torneamento. Entretanto, para o cálculo do custo de ferramenta por peça são necessárias duas equações diferentes, pois as ferramentas envolvidas têm características distintas. Assim temos:

a) Custo de ferramenta por peça para o torneamento

É calculado pela seguinte equação:

$$K_{uf} = \frac{1}{Z_t} * K_{ft} \text{ [R\$]} \quad (3.33) ; \quad K_{ft} = \frac{1}{n_{ft}} * V_{si} + \frac{K_s}{n_s} \text{ [R\$]} \quad (3.34)$$

onde:

K_{ft} = custo da ferramenta por vida T, [R\$]

Z_t = número de peças usinadas por vida T da ferramenta;

n_{ft} = vida média do porta ferramentas em quantidade de fios de corte (no nosso caso adotamos 1000)

V_{si} = custo de aquisição do porta ferramentas [R\$];

K_s = custo de aquisição do inserto [R\$];

n_s = número de fios de corte do inserto.

b) Custo de ferramenta por peça para a retificação

Na retificação temos:

b.1) Número de dressagens por vida útil do rebolo – " n_{dr} "

$$n_{dr} = \frac{(d_{ir} - d_{fr})}{a_{dt}} \quad (3.35)$$

Onde :

d_{ir} = diâmetro inicial do rebolo [mm]

d_{fr} = diâmetro final do rebolo [mm]

a_{dt} = profundidade de dressagem total [mm]

b.2) Lote total de peças produzidas por rebolo "Z"

$$Z = n_{dr} * PPd \quad (3.36)$$

Onde :

PPd = número de peças produzidas por dressagem (eq.3.14)

Portanto, para obtermos o custo de ferramenta por peça temos:

$$K_{ufr} = \frac{(K_r + K_{dr})}{Z} \text{ [R\$]} \quad (3.37)$$

Onde :

Kufr = custo de ferramental por peça para a retificação [R\$]

Kr = custo de aquisição do rebolo [R\$]

Kdr = custo do dressador por rebolo (p.ex, 1 dressador pode ser usado para 2 rebolos) [R\$]

3.5 – Comparação entre os custos de ferramental por peça na retificação e no torneamento.

Neste estudo são considerados apenas os custos de ferramental por peça, uma vez que a análise do custo total de fabricação por peça é dificultado, em virtude de diferentes valores de mercado das máquinas ferramentas, salários etc.

Assim considera-se as equações:

a) Na retificação

$$K_{ufr} = \frac{(K_r + K_{dr})}{Z} \quad ; \quad Z = n_{dr} * PPd \quad ; \quad n_{dr} = \frac{(d_{ir} - d_{fr})}{a_d}$$

b) No torneamento

$$K_{uf} = \frac{1}{Z_t} * K_{ft} \quad ; \quad K_{ft} = \frac{1}{n_f t} * V_{st} + \frac{K_s}{n_s}$$

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} . Nos próximos capítulos são descritos os procedimentos para a obtenção e comparação de tais grandezas.

4 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 - Introdução

O objetivo principal deste experimento é comparar o processo de retificação com o torneamento de materiais endurecidos, no nosso caso o aço SAE 4340 – temperado (51 HRc).

Para efetuar-se a referida comparação, adotou-se a qualidade IT 8 para o controle dimensional das peças, adotando-se como de fim de vida das ferramentas os seguintes parâmetros, verificados nas peças : variação dimensional, rugosidade superficial Ra – CLA (“Center Line Average”) e circularidade. A partir da obtenção destes parâmetros, é possível estimar-se a vida das ferramentas e, conseqüentemente, o custo necessário para a produção de peças com esta qualidade nos dois processos, auxiliando assim numa tomada de decisão quanto a qual dos dois processos é o mais adequado para produzir um componente, sob determinadas condições pré-estabelecidas.

4.2 – Descrição dos Experimentos

4.2.1 - Retificação

Consiste na usinagem de peças em operação de retificação cilíndrica em mergulho com várias condições de usinagem. Cada condição de usinagem utilizada produz um lote de peças, cujo tamanho é limitado pela vida do rebolo. Os parâmetros utilizados para determinar o fim de vida do rebolo são: rugosidade superficial Ra , a variação dimensional das peças e a circularidade.

Os dados deste experimento foram extraídos da experimentação realizada previamente [22] , pois o corpo de prova utilizado para a

retificação é o mesmo corpo de prova utilizado para o torneamento, e os dados disponíveis atendem aos nossos propósitos.

4.2.2-Torneamento

O experimento consiste de uma seqüência de usinagem em operação de torneamento de material endurecido (“hard turning”), utilizando-se diferentes condições de usinagem. Cada condição de usinagem utilizada produz um lote de peças, cujo tamanho é limitado pela vida do inserto. Os parâmetros de fim de vida são os mesmos adotados na retificação, ou seja, variação dimensional da peça, rugosidade Ra e circularidade.

As profundidades de usinagem adotadas são aquelas consideradas como de acabamento, isto é, $a_p \leq 0,5$ mm.

4.3 – Bancos de Ensaio

Os bancos de ensaios utilizados para a realização dos experimentos são:

4.3.1 - Na Retificação

- Uma Retificadora cilíndrica CNC “ZEMA ZSELICS G800”.
- Um sistema Taly Rond 250 com filtro passa baixo;
- Um micrômetro marca Tesa, com resolução de 1 μ m;
- Um rugosímetro marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3P;
- Um rebolo AA 80 G 6V;
- Um rebolo AA 80 R 6V;

4.3.2 – No Torneamento

- Torno CNC INDEX GU 600 (comando Siemens 810 D);
- Inserto de PCBN – “Tipped” SNGN 12 04 08 – SANDVIK;
- Porta ferramentas CSSNL 2525 M12-IC-SANDVIK;
- Um rugosímetro marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3P;
- Um micrômetro marca Tesa, Com resolução de 1 μ m.

4.4 - Ensaio Preliminares

O corpo de prova é constituído de uma peça de aço SAE 4340 – temperado (51 HRC), usinado a partir de uma mesma barra, com dimensões conforme figura 4.1.

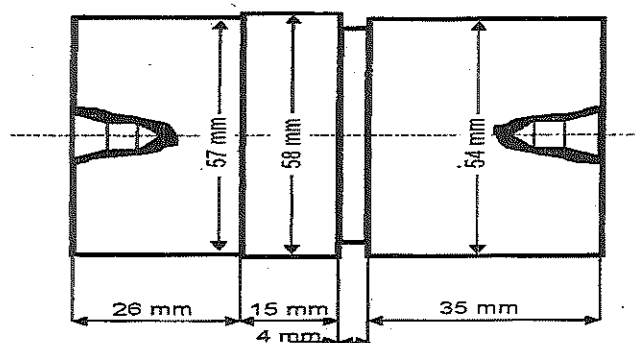


FIGURA 4.1 – CORPO DE PROVA DE AÇO SAE 4340 – TEMPERADO (51 HRC), UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS DE RETIFICAÇÃO E TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO.

Num primeiro passo, foi dada uma pequena passada em operação de retificação no diâmetro de 57 mm, com o objetivo de melhorar a concentricidade entre o centro da peça e o seu diâmetro externo, utilizado para prender a peça à placa de 3 castanhas do torno. Mesmo assim, foi verificada se a peça estava bem centrada na castanha antes da usinagem, necessitando às vezes de pequenos ajustes antes do início de cada operação.

A seguir, utilizando-se de um inserto de cerâmica, foi efetuada uma limpeza no diâmetro de 54 mm, para deixar o diâmetro uniforme ao longo do comprimento de corte, pois a experimentação de retificação cilíndrica em mergulho foi feita com largura de corte menor do que a largura do rebolo, em virtude da baixa potência da retificadora, formando degraus na peça.

4.5 – Condições de Ensaio de torneamento

Foi realizada uma seqüência de ensaios a partir de um único arranjo da máquina ferramenta – torno/porta ferramenta/inserto, variando-se as condições de usinagem e medindo-se os parâmetros já citados, sendo que todos os experimentos foram realizados sem refrigeração (a seco).

A tabela 4.1 nos mostra as condições de usinagem utilizadas nos ensaios de torneamento.

Tabela 4.1 - Condições de usinagem utilizadas para o experimento de torneamento de aço SAE 4340 – temperado (51 HRc) com inserto de PCBN

	Veloc.corte v_c [m/min]	Avanço [f] [mm/volta]	Prof.corte [a_p] [mm]	Comp.corte L_f [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

Durante a usinagem na condição 1, usinava-se 5 peças e interrompia-se o processo para verificação das peças quanto à variação dimensional, rugosidade R_a e circularidade, efetuando-se a verificação em 100% das peças. Este procedimento foi tomado para todas as peças usinadas na condição 1. Terminado o primeiro lote de peças, verificou-se que a circularidade não era um item determinante na vida da ferramenta, pois permaneceu num patamar constante em torno de $1.7\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$. Desta forma optou-se por um controle estatístico da circularidade para as demais condições. Os outros parâmetros continuaram a ser controlados em 100% das peças.

Além disso, foram medidas novamente a dureza de algumas peças, tomadas aleatoriamente, a fim de verificar-se se a dureza permanecia após a retirada da camada de 0,5 mm. Constatou-se que a dureza permaneceu num patamar de 50,5 HRc após o primeiro ensaio.

Para as demais condições foi usinado, sem interrupção, um lote de aproximadamente 20 peças, que, constatou-se, era aproximadamente a

vida média do inserto de PCBN para as condições utilizadas, com um controle de 100% para a variação dimensional e para a rugosidade Ra logo após a retirada de cada peça.

Alguns ensaios foram prolongados, mesmo após a variação dimensional da peça já ter ultrapassado o valor limite ($46\ \mu\text{m}$ para a variação dimensional com dimensões $\geq 50\ \text{mm}$ e $1,2\ \mu\text{m}$ para a rugosidade Ra) [30], a fim de visualizarmos o comportamento do inserto trabalhando após o momento ideal para troca e também para deixar as peças com medidas mais uniformes para os demais ensaios.

Todos os experimentos foram realizados com as peças sempre na mesma seqüência.

5.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram efetuados vários experimentos utilizando-se as operações de torneamento e retificação de material endurecido. Foi escolhido um aço SAE 4340 temperado (51 HRC), material que é largamente utilizado pela indústria auto-mecânica para a confecção de eixos de transmissão, válvulas etc. Desta forma, simulou-se a usinagem de um colo de mancal com qualidade IT8, operação possível de ser realizada tanto pelo torneamento quanto pela retificação. A operação de retificação adotada foi a de mergulho, onde a largura de corte é menor ou igual à largura do rebolo.

Ambas as operações foram realizadas em equipamentos que representam o que há de mais moderno na indústria nacional, equipados com controladores numéricos computadorizados (CNC) e utilizando-se de ferramentas que também são comuns no parque industrial nacional, ou seja, rebolos de óxido de alumínio e inserto de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), do modelo “tipped”(pequenos cristais de PCBN soldados num substrato), procurando assim simular uma situação real existente em nossas indústrias. A seguir serão apresentados os resultados obtidos no torneamento e na retificação da peça citada, com breve discussão sobre estes.

5.1 – Condições de usinagem adotadas.

As tabelas 5.1 e 5.2 a seguir apresentam, respectivamente, as condições de usinagem utilizadas no torneamento e na retificação. As condições do torneamento foram adotadas com base na qualidade final desejada para as peças. Na retificação foram realizados testes prévios [22] , onde procurou-se condições compatíveis com o acabamento desejado e a potência disponível na máquina.

Tabela 5.1 – condições de usinagem utilizadas no torneamento do aço SAE 4340-endurecido (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 5.2 – Condições de usinagem utilizadas na retificação do aço SAE 4340 endurecido (51 HRc)

Dureza do rebolo	Avanço do rebolo F (mm/min)	Sobremetal Usinado no diâmetro (mm)	Ud	Tempo de sparkout t (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

5.2 – Variações dimensionais

A qualidade IT8 para peças com diâmetro variando entre 50 e 80 mm tem como variação dimensional limite o valor de 46 μm [30]. Utilizando-se deste parâmetro, foram usinados vários corpos de prova com as condições de usinagem mostradas na tabela 5.1, obtendo-se assim o

gráfico exibido na figura 5.1 a seguir, da variação dimensional pelo número de peças usinadas .

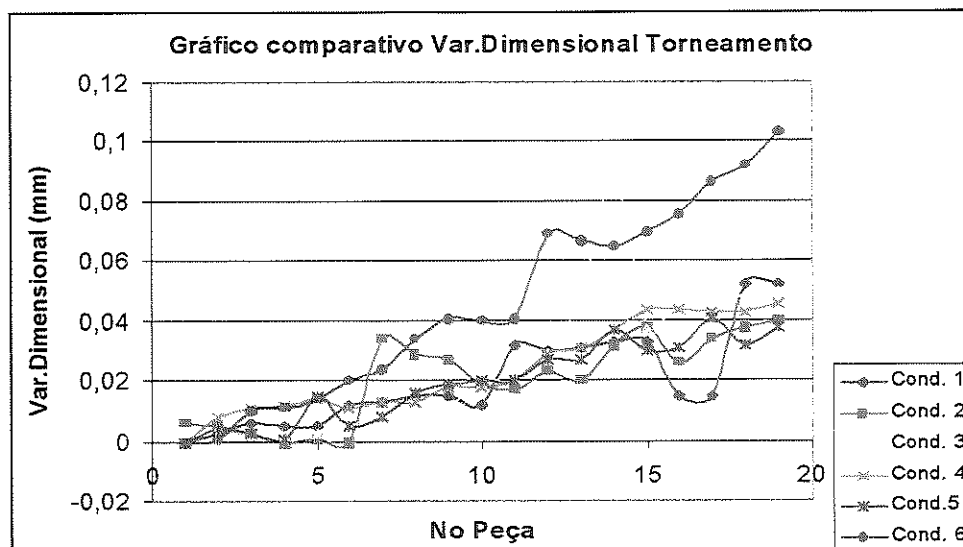


FIGURA 5.1 – GRÁFICO COMPARATIVO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS OBTIDAS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES DE TORNEAMENTO UTILIZADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 – ENDURECIDO(51 HRC), COM CONDIÇÕES CONFORME TABELA 5.1.

Do gráfico é possível observar-se que, apesar das diferentes condições de usinagem utilizadas, a tendência da variação dimensional é aproximadamente a mesma para a maioria delas, com oscilações para uma ou outra condição.

A condição de usinagem mais severa— condição 6, com velocidade de corte $v_c = 500$ m/min e profundidade de usinagem $a_p = 0.1$ mm – foi utilizada com o intuito de conhecer-se o comportamento das grandezas medidas (variação dimensional, rugosidade R_a e circularidade) em condições extremas, além de testar-se a resistência do inserto, pois a literatura [16] não recomendava a utilização de insertos soldados (“tipped”) a velocidades de corte acima de 220 m/min, em virtude do risco da brasagem (solda) entre o cristal de CBN e o substrato não agüentar os altos esforços e soltar-se. Nesta condição foi observado um alto nível de vibração durante a usinagem, com um rápido desgaste da ferramenta e reduzida vida útil, sendo

que somente 11 peças ficaram dentro do limite especificado ($46 \mu\text{m}$). Entretanto, o inserto de PCBN comportou-se bem apesar do desgaste acelerado.

Com as condições de usinagem utilizadas e com a qualidade IT8 como limite, observou-se uma vida média do inserto de 20 peças por aresta, com exceção da condição de número 6, o que dá um total de 160 peças/inserto.

Os resultados das variações dimensionais obtidas no torneamento comparados às variações dimensionais obtidas na retificação, para o mesmo sobremetal usinado, são apresentados na figura 5.2.

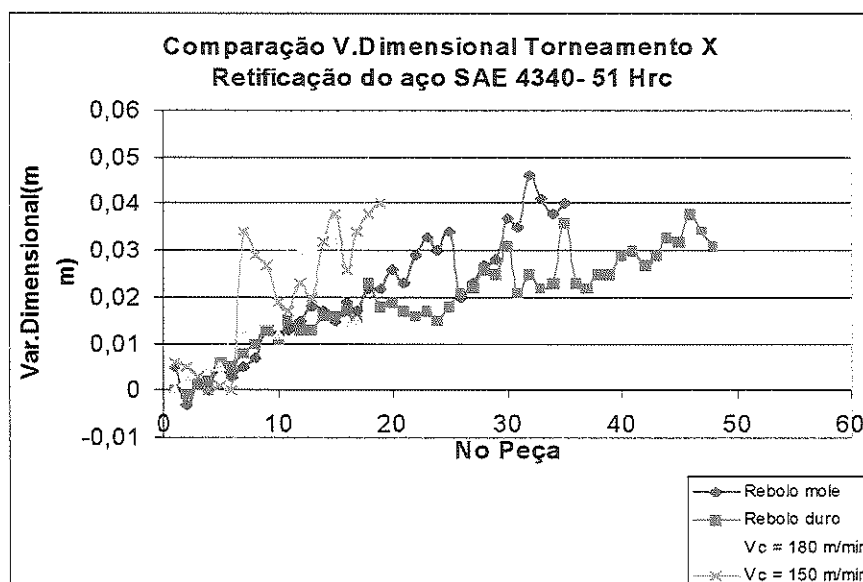


FIGURA 5.2 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS OBTIDAS NA RETIFICAÇÃO E NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 – 51 HRC, COM SOBREMETAL USINADO DE 0.5 MM NO DIÂMETRO.

Conforme verifica-se na figura 5.2, a retifica o apresenta uma estabilidade dimensional muito maior que o torneamento, sendo que o rebolo duro apresenta melhores resultados que o rebolo mole. Isto ocorre porque o rebolo mole produz maiores oscila es dimensionais, além de atingir o limite estabelecido com apenas 32 peças. Já o rebolo duro tem maior estabilidade dimensional, além de maior vida útil, pois com 48 peças usinadas ainda não atingiu o limite $46 \mu\text{m}$.

Em contrapartida, o torneamento apresenta grandes variações dimensionais logo no início do processo, com oscilações na variação dimensional de 16 até 32 μm . Este nível de oscilação, permitido para a qualidade proposta neste trabalho (IT8), seria inadmissível para as qualidades IT7 com diâmetro da peça na faixa de 50 a 80 mm, pois a variação limite para esta é de 30 μm e muito menos para a qualidade IT6 (19 μm).

Na figura 5.3 é possível observar-se que há uma pequena correlação na peça torneada entre a variação dimensional e a rugosidade superficial Ra.

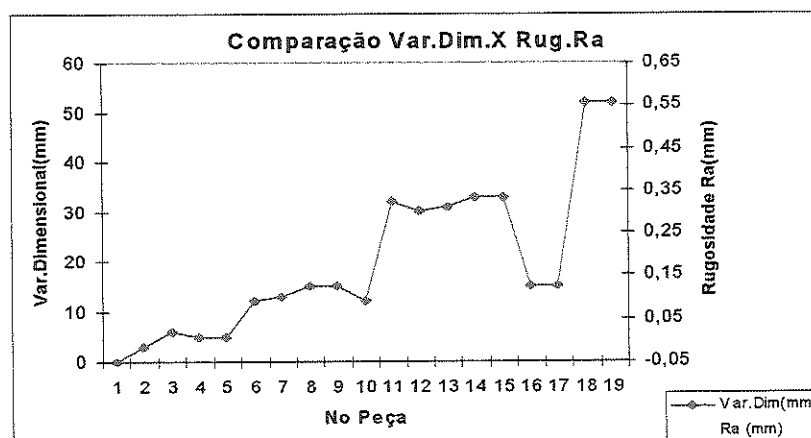


FIGURA 5.3 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS E A RUGOSIDADE RA PARA A CONDIÇÃO DE TORNEAMENTO 1 –VEL. CORTE $v_c = 180$ M/MIN, PROF. USINAGEM $a_p = 0,5$ MM, AVANÇO $f = 0,08$ MM/ROT.

Do gráfico observa-se que, para um eventual aumento ou diminuição na variação dimensional da peça ocorre simultaneamente uma melhora ou piora da qualidade superficial da peça. Este fato pode ser explicado em virtude de uma perda de material ocorrida na ponta da ferramenta, produzindo uma rugosidade menor, ou a ocorrência de uma aresta postiça, que provocaria a diminuição dimensional da peça, associada a um aumento da rugosidade.

5.3 – Rugosidade Superficial Ra obtidas no torneamento e na retificação do aço SAE 4340 – endurecido (51 HRC)

A medição da rugosidade Ra – CLA (do inglês – “center line average”- rugosidade medida pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num determinado comprimento de amostragem) foi efetuada da mesma maneira para as peças produzidas no torneamento e na retificação, ou seja, as medidas foram tomadas em três pontos equidistantes ao longo do diâmetro da peça . As medições efetuadas nas peças torneadas são mostradas no gráfico da figura 5.4.

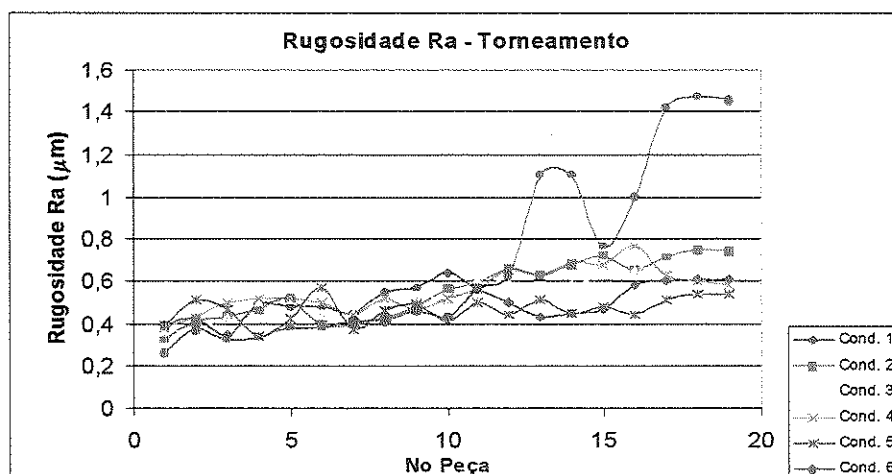


FIGURA 5.4 – GRÁFICO COMPARATIVO DAS RUGOSIDADES OBTIDAS PARA AS DIVERSAS CONDIÇÕES DE USINAGEM UTILIZADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340-ENDURECIDO (51 HRC).

É possível observar-se no gráfico que as curvas relativas às diversas condições utilizadas (exceto a de número 6) têm um comportamento muito semelhante, permanecendo num patamar bem inferior ao limite normalizado estabelecido em peças com qualidade IT8 [30] para o diâmetro usinado ($Ra \cong 1,2 \mu m$). Este fato deve-se em parte ao avanço f adotado para esta experimentação ($f = 0,08 \text{ mm/volta}$), valor este normalmente utilizado para operações de acabamento no torneamento para a geometria do inserto utilizado (raio de ponta = $0,8 \text{ mm}$). Caso se deseje menores tempos de corte

no torneamento, é possível aumentar este valor do avanço até 0,16 mm/volta para esta mesma geometria. Obviamente haverá um aumento no valor de Ra.

A figura 5.5 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.

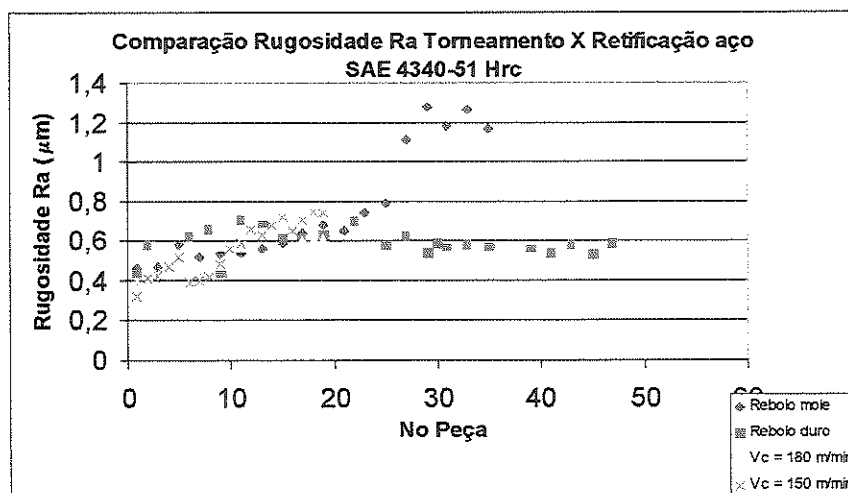


FIGURA 5.5 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS RUGOSIDADES OBTIDAS NA RETIFICAÇÃO E NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 – 51 HRC

Do gráfico observa-se que os valores de rugosidade Ra obtidos no torneamento e na retificação com o rebolo duro mantêm-se num mesmo patamar, na faixa de 0,35 a 0,70 μm , sendo que a tendência no torneamento é de aumento, enquanto na retificação este patamar praticamente permanece estável em torno de 0,60 μm . 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 1,2 μm 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.

Apesar de alguns trabalhos colocarem a rugosidade Ra como um bom critério para a determinação do fim de vida de uma ferramenta de ponta única [31], analisando-se os experimentos realizados verifica-se que a

variação dimensional da peça é um fator mais crítico para a determinação do fim de vida da ferramenta de ponta única, apesar da possibilidade de se efetuar a compensação das medidas num equipamento com controlador numérico computadorizado (CNC). Entretanto esta compensação necessitaria de um operador controlando a operação de torneamento para determinar o momento exato de efetuá-la.

Além disso, com o aumento do desgaste frontal V_B da superfície de folga da ferramenta ocorre um aumento da área de atrito entre a peça e a ferramenta, gerando um calor que é transferido para a peça (80% aproximadamente). Este aumento de temperatura pode provocar tensões residuais de tração na superfície da peça, o que não é desejável quando se trata de componentes sujeitos a altas solicitações como eixos, engrenagens etc.

Este aumento de temperatura foi detectado em nossos experimentos, principalmente nos ensaios realizados com a condição 1 e 2, onde as profundidades de usinagem a_p eram de 0,5 mm. No início dos ensaios, as peças saíam do torno com uma temperatura normal (frias). Após a usinagem de um determinado número de peças já se notava um aquecimento do material destas, provavelmente devido ao atrito entre a peça e a ferramenta em virtude do aumento do desgaste frontal da ferramenta, sendo que as últimas peças usinadas na condição 1 saíram com uma temperatura muito elevada, dificultando o seu manuseio.

A figura 5.6 apresenta as fotos da aresta do inserto utilizada nos ensaios da condição 1.

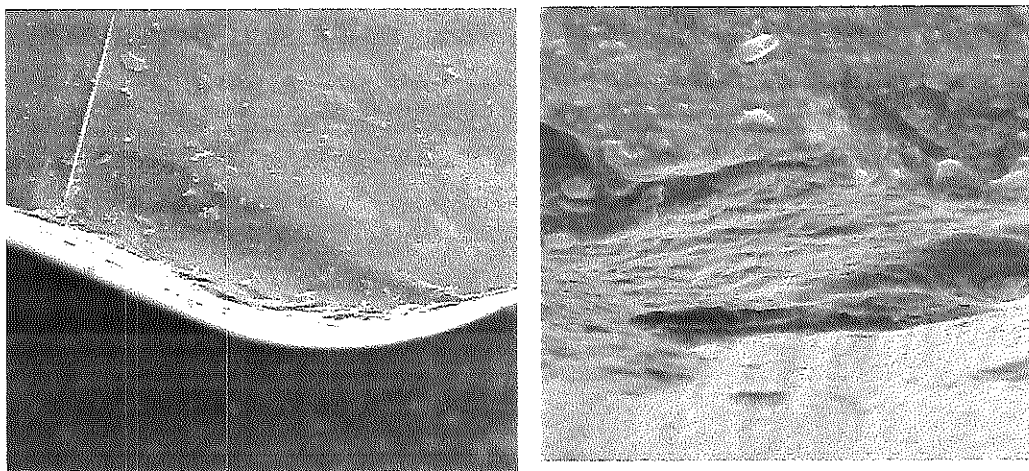


FIGURA 5.6 – FOTO DA ARESTA DO INSERTO UTILIZADA PARA A USINAGEM DO AÇO SAE 4340 (51 HRC) NA CONDIÇÃO 1 ($v_c = 180$ M/MIN) MOSTRANDO UM DESGASTE POR CRATERA E AMPLIAÇÃO MOSTRANDO O DESGASTE DE FLANÇO, COM DETERIORAÇÃO DO MATERIAL PCBN

Nas fotos da figura 5.6 é possível observar o tipo de desgaste ocorrido no inserto de PCBN utilizado, mostrando um desgaste por crateramento na superfície de saída da ferramenta, em virtude do atrito entre a ferramenta e o cavaco do material usinado. Na ampliação desta foto é possível visualizar a deterioração do material do inserto ocorrida na superfície de folga.

5.4 – Análise dos processos quanto à questão ambiental

No tocante à questão relativa ao meio ambiente, é inquestionável a vantagem do processo de torneamento sobre a retificação, pois o torneamento pode ser executado sem a utilização de fluidos refrigerantes (a seco), que normalmente são produtos freqüentemente fabricados com cloro (organoclorados), podendo provocar doenças nos operadores devido à névoa provocada pela evaporação do fluido e ao manuseio destes, além de contaminar o solo e mananciais, quando não sofrem tratamento antes do descarte, fato este comum no mercado nacional.

Já o processo de retificação não pode ser executado sem o uso de fluido refrigerante. Isto ocorre porque o processo de abrasão do material gera grandes temperaturas, que queimam a superfície da peça se não forem devidamente refrigeradas. Além disso, o líquido refrigerante auxilia no processo de retirada do cavaco do arco de corte e na limpeza da superfície do rebolo, deixando os grãos abrasivos livres para o corte.

5.5 – Análise comparativa de tempo de produção

5.5.1 – Para uma largura de corte menor ou igual à largura do rebolo ($b_w \leq b_{se}$)

Utilizando-se das equações para a determinação dos tempos de torneamento (3.11) e de retificação (3.19), pode-se calcular os respectivos tempos de usinagem em função do sobremetal, cujos resultados são mostrados na figura 5.6 a seguir. As condições adotadas para o cálculo dos tempos de usinagem foram:

a) Torneamento

$v_c = 180$ m/min ;

$f = 0.08$ mm/volta;

b) Retificação

Velocidade de avanço $F = 0.5$ mm/min

$t_{so} = 0.07$ min

$t_a + t_s = 0.15$ min para o torneamento e para a retificação;

Comprimento de corte $b_w = 35$ mm para ambos os processos



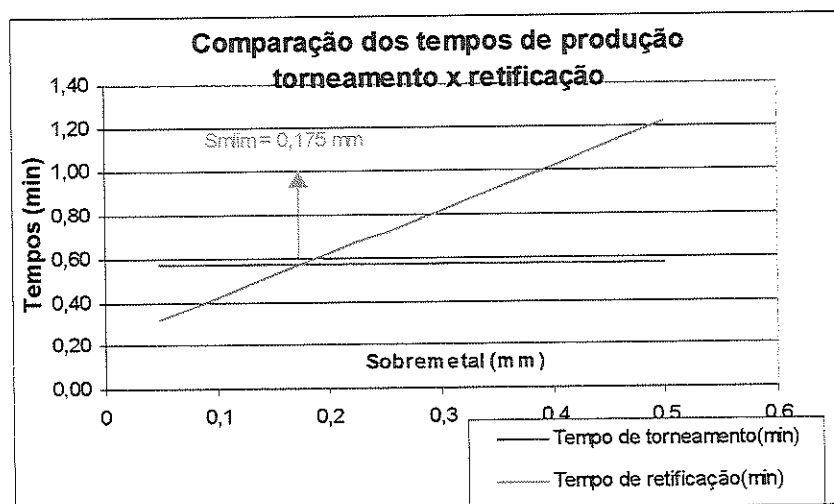


FIGURA 5.7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE TORNEAMENTO E DE RETIFICAÇÃO NA USINAGEM DO AÇO SAE 4340 (51 HRC) E VERIFICAÇÃO DO SOBREMETAL LIMITE.

Utilizando-se a equação 3.26, encontra-se o valor do sobremetal limite igual a 0.175 mm para as condições adotadas, valor este igual ao encontrado graficamente na figura 5.7. Como pode-se verificar na figura 5.7, valores de sobremetal maiores que o sobremetal limite ($S_m > S_{mlim}$) implicam em tempos de retificação maiores que os tempos de torneamento.

5.5.2 – Influência da largura de corte nos tempos de torneamento e retificação.

Adotando-se um sobremetal fixo é possível observar-se a influência da largura de corte sobre os tempos de torneamento e retificação. Utilizando-se, para isto, das equações 3.11 para o tempo de torneamento e 3.20 para o tempo de retificação, pois na faixa avaliada a retífica efetuará, em larguras de corte maiores que o rebolo, mais de uma entrada na peça. As figuras 5.8 e 5.9 apresentam as curvas relativas aos tempos obtidos em função dos sobremetals adotados e das condições utilizadas. Neste caso as condições são as mesmas do item 5.5.1.

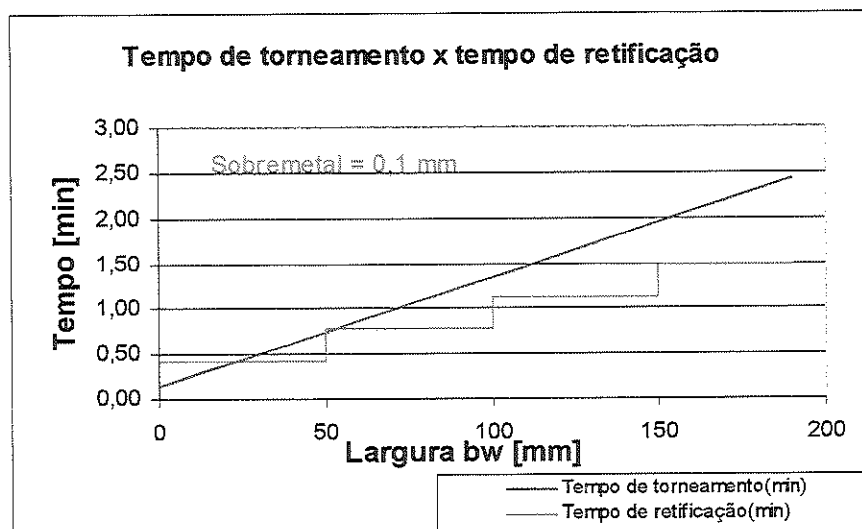


FIGURA 5.8- TEMPO DE TORNEAMENTO X TEMPO DE RETIFICAÇÃO PARA UM SOBREMETAL FIXO ($S_m=0.1\text{MM}$) E VARIAÇÃO NA LARGURA DE USINAGEM b_w .

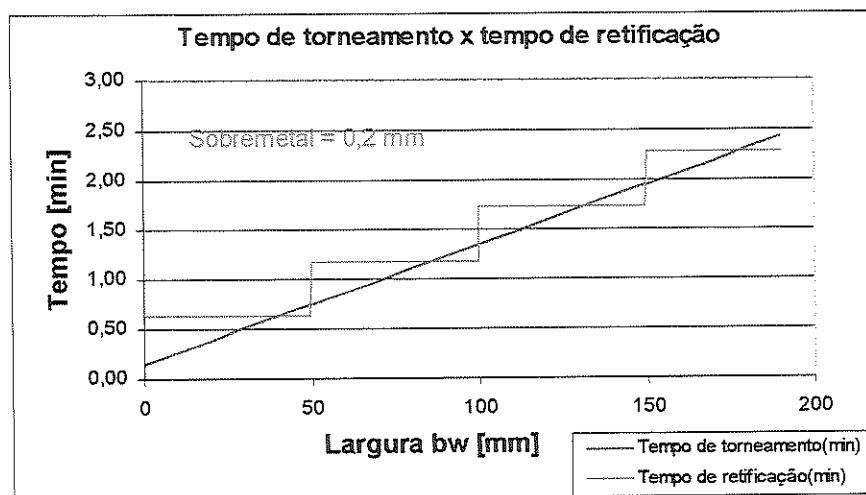


FIGURA 5.9- TEMPO DE TORNEAMENTO X TEMPO DE RETIFICAÇÃO PARA UM SOBREMETAL FIXO ($S_m=0.2\text{MM}$) E VARIAÇÃO NA LARGURA DE USINAGEM b_w .

Observando-se as figuras 5.8 e 5.9 nota-se claramente que os tempos de torneamento aumentam continuamente com o aumento da largura de corte b_w , enquanto os tempos de retificação mantêm-se constantes num determinado patamar, onde as larguras de corte são menores ou iguais à largura do rebolo. Quando a largura de corte é maior

que a largura do rebolo, o tempo de retificação aumenta para um novo patamar, mantendo-se constante, e assim por diante.

Observa-se ainda das figuras que o tempo de torneamento tende a zero para larguras de corte muito pequenas e que os tempos de retificação deslocam-se para cima ou para baixo, de acordo com os valores de sobremetal utilizados. Portanto, para pequenos valores na largura de corte o torneamento é mais vantajoso que a retificação.

Entretanto, para valores de sobremetal pequenos a retificação já se torna bastante competitiva. No gráfico da figura 5.8, onde o sobremetal considerado é igual a 0.1 mm, observa-se uma vantagem da retificação sobre o torneamento a partir de uma largura $b_w = 23$ mm, ou seja, quanto menor for o sobremetal, maior será a vantagem da retificação sobre o torneamento no aspecto relativo ao tempo de corte.

No gráfico da figura 5.9, onde o sobremetal considerado é igual a 0.2mm, observa-se uma alternância nos tempos de usinagem, ora com vantagem para o torneamento, ora com vantagem para a retificação. É possível ainda prever-se que, para um sobremetal maior que 0.25 mm e com as condições de usinagem adotadas, os tempos de torneamento serão menores que os tempos de retificação.

5.6 - Análise comparativa de custo de ferramenta

O custo de ferramenta por peça é outro fator que exerce grande influência numa tomada de decisão para a escolha entre os processos de torneamento e retificação. Para efetuar-se uma comparação entre o custo de ferramenta por peça para o torneamento " K_{uf} " e o custo de ferramenta por peça para a retificação " K_{ufr} " utilizam-se as equações 3.33 e 3.37, a saber:

Custo de ferramenta/peça para o torneamento :

$$K_{uf} = \frac{1}{Z_t} * K_f$$

$$\text{Onde: } K_f = \frac{1}{n_f t} * V_{si} + \frac{K_s}{n_s}$$

Custo de ferramenta/peça para a retificação:

$$K_{ufr} = \frac{(K_r + K_{dr})}{Z}$$

Utilizando-se os parâmetros obtidos na experimentação tem-se (para uma faixa útil de utilização do rebolo de 100 mm e com profundidade de dressagem $a_{dt} = 0.04$ mm) da equação 3.35 o número de dressagens por vida útil do rebolo $n_{dr} = 2500$.

Na experimentação com o rebolo duro, onde obtiveram-se os melhores resultados, foram usinadas 60 peças por dressagem (PPd). Adotando-se uma margem de 50% para este número, ou seja, considerando-se que $PPd = 30$, tem-se da equação 3.36 que o lote de peças total produzido pelo rebolo é dado por: $Z = n_{dr} * PPd$, portanto:

$$Z = 2500 * 30 = 75000 \text{ peças/rebolo}$$

Utilizando-se a equação 3.37, para um custo do rebolo mais dressador $K_r + K_{dr} = R\$ 300,00$, obtém-se $K_{ufr} = R\$ 0.004/\text{peça}$

Para se avaliar qual seria o número de peças por vida T da ferramenta Z_t , no torneamento com o mesmo custo, basta substituir-se K_{ufr} por K_{ur} e determinar o valor de Z_t , ou seja:

$$0.004 = \frac{1}{Z_t} * \left(\frac{1}{1000} * 200 + \frac{160}{8} \right)$$

Portanto, $Z_t = 5050$ peças por vida útil do inserto, isto é, 632 peças por aresta, o que é impossível de obter-se, mostrando pois uma vantagem para o processo de retificação quanto ao custo de ferramenta/peça.

Quanto ao custo dos equipamentos, tem-se normalmente que uma retificadora custa de 1,5 a 2 vezes o preço pago por um torno. Entretanto um equipamento apropriado para usinagem de materiais endurecidos deve ser mais rígido, o que aumenta o seu custo e, conseqüentemente, diminui a diferença em relação aos equipamentos de retificação.

6.0 – CONCLUSÕES

Analisando-se a literatura referenciada e os resultados obtidos nos experimentos, é possível obter-se as seguintes conclusões sobre os processos de retificação e de torneamento e a influência do sobremetal para a escolha do processo ideal de usinagem – retificação ou torneamento.

- O torneamento compete hoje com a retificação na usinagem de aços endurecidos, graças aos novos materiais de ferramentas existentes – CBN e cerâmicas;
- É possível tornear-se aços endurecidos com qualidade IT8 utilizando-se tornos modernos equipados com controladores numéricos computadorizados (CNC) de última geração e ferramentas de nitreto de boro cúbico (CBN);
- Nos experimentos realizados o processo de retificação mostrou-se mais estável que o de torneamento, não apresentando grandes variações dimensionais e de rugosidade durante sua execução, sendo portanto mais seguro para a obtenção de tolerâncias muito apertadas (abaixo de IT7) e mais adequado para automação;
- O torneamento é um processo bastante competitivo para a usinagem de peças onde o comprimento de corte é muito pequeno ou onde o sobremetal a ser usinado é muito grande, apresentando nestes casos tempos de corte inferiores aos da retificação;
- A retificação é mais rápida que o torneamento para pequenos valores de sobremetal e para grandes larguras de corte quando retificadas com rebolos mais largos;
- A retificação apresenta grande vantagem sobre o torneamento quanto ao fator custo de ferramenta por peça, devido ao alto custo dos insertos de CBN, sendo portanto melhor indicada para a produção de grandes lotes de peças;
- A retificação pode ser indicada para operações que não sejam gargalos, pois apesar de apresentar tempos de usinagem maiores na maior parte das vezes tem custo bem inferior ao torneamento;

- 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;
- Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação do sobremetal limite, a partir do qual os tempos de retificação serão maiores que os tempos de torneamento. No caso estudado, um caso típico de usinagem de eixos multi-diâmetros de aço SAE 4340 – 51 HRc, o valor do sobremetal limite é de 0.175 mm.

Desta forma, é possível comparar-se os processos de torneamento e de retificação e analisar-se a influência do sobremetal para a escolha de qual processo é mais vantajoso entre os dois, ajudando assim aos engenheiros de processos numa tomada de decisão dentro da indústria metal-mecânica.

6.1 – Sugestões para trabalhos futuros

Fica como sugestão para trabalhos futuros :

- Comparar os dois processos utilizando-se outros materiais como corpo de prova e outras condições de usinagem;
- Comparar os dois processos utilizando-se outras ferramentas, tais como insertos cerâmicos , “cermets”, rebolos de CBN etc.;
- Utilizar outros tipos de fluidos refrigerantes;
- Avaliar as tensões residuais produzidas nas subcamadas das peças usinadas e analisar suas prováveis influências no comportamento final do componente;
- Avaliar o impacto ambiental decorrente dos resíduos e emissões produzidos nos dois processos.

7.0- BIBLIOGRAFIA

7.1 – BIBLIOGRAFIA CITADA

- [1] ARNOLD, D.B.; MOMPER, F.J. (1997). Machining challenges. *Manufacturing Engineering*, v.119, n.5, Nov.
- [2] LEE, J.(1997). Overview and perspectives on japanese manufacturing strategies and production practices in machinery industry. *Journal of Manufacturing Science and Engineering – Transaction of the ASME*, v.119, p. 726-731, Nov.
- [3] LEWIS, D.L.(1997). A que velocidade andará a usinagem no século 21, lá pelo ano 2005? *Máquinas e Metais*, p.24-33, Fev.
- [4] BECK, H.W.(1998).Alta velocidade e ferramentas de alto desempenho reduzem o tempo de usinagem. *Máquinas e Metais*, n.387, p.41-47, Abr.
- [5] GOULDING, R.(1997). Turning for near-net-shape parts. *Manufacturing Engineering*, v.119, n.2, Aug.
- [6] BRAYNE, K. (1998). Forming companies goes near-net-shape.*Metallurgia*, v.65, n.4, p.145, Apr.
- [7] KÖNIG, W.; RUMMENHÖLLER, S. (1998). As indústrias estão tendo que orientar ecológicamente seus processos produtivos. *Máquinas e metais*, n.387, p. 22-29, Abr.

- [8] KRESS, D. (1997). Dry cutting with finish machining tools. *Industrial Diamonds Review*, v.57, n.574, 2p, Mar.
- [9] OWEN, J.V. (1998). Materials drive grinding. *Manufacturing Engineering*, v.120, n.2, p.42-49, Feb.
- [10] HASAN, R. (1998). Why are you still grinding? *Manufacturing Engineering*, v.120, n.2, p.76-80, Feb.
- [11] BOGGIO, U. (1996). The recipe for good hard turning. *Manufacturing Engineering*, v.116, n.3, p. 95-106, Mar.
- [12] KÖNIG, W.; IDING, M.; LINK, R.(1990). Fine turning & drilling hardened steels. *Industrial Diamond Review*, v.50, n.537, p.79-85, Jan.
- [13] NOAKER, P. (1991). Turning up iron and steel machining. *Manufacturing Engineering*, v.106, n.1, p.28-33, Jan.
- [14] NOAKER, P. (1992). Hards facts on hard turning. *Manufacturing Engineering*, v.108, n.2, p. 43-46, Feb.
- [15] BOSSOM, P.K. (1990). Finish machining of hard ferrous workpiece. *Industrial Diamond Review*, v.50, n.540, p.228-232, May.
- [16] 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.
- [17] MATSUMOTO, H.(1998). **Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos.** . Campinas.133 p. Tese de doutorado, FEM da Universidade Estadual de Campinas.

- [18] NOAKER, p. (1994). Grinding and finishing. *Manufacturing Engineering*, v.113, n.2, 12 p, Aug.
- [19] ARONSON, R.B. (1997). Grinding's going high-tech. *Manufacturing Engineering*, v.118, n.2, Feb.
- [20] KÖNIG, W.; FERLEMANN, F. (1991). A new dimension for high speed grinding. *Industrial Diamond Review*, v.51, n.552, 5p, May.
- [21] WOODSIDE, J. (1988). High speed grinding proved in production. *Tooling & production*, v.54, n.2, p.58-62, May.
- [22] GOMES, J.J.F.(1997). **Sistema de calibração**. São Carlos. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [23] HASSUI , A. et al. (1998). Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *WEAR*, n.217, p.7-14, Feb.
- [24] FELIPE JR, J.; OLIVEIRA, J.F.G.(1998). A retificação inteligente é mais confiável e menos dependente do operador. *Máquinas e Metais*, n.386, p. 80-98, Mar.
- [25] OLIVEIRA, J.F.G.; et al. (1998). Intelligent grinding systems (igs): high reliability and automation level in precision grinding. *Abrasives*, p. 11-22, Jun/Jul.
- [26] FELIPE JR, J. (1992). **Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed**. São Carlos.190 p. Dissertação

(Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

- [27] TÖNSHOFF, H.K.; HETZ, F. (1987). Influence of the abrasive on fatigue in precision grinding. *Journal of Engineering for Industry – Transaction of the ASME*, v.109, n.3, p.203-205, Aug.
- [28] BRINKSMEIER, E.; et al.(1982). Residual stress – measurement and causes in machining processes. *CIRP's Annals*, p.491-510, Feb.
- [29] 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.
- [30] AGOSTINHO, O.L.;RODRIGUES,A.C.S.; LIRANI,J. (1988). *Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões*. 4.ed. São Paulo, Edgard Blücher.
- [31] DINIZ, E.A.(1989) .**A rugosidade superficial da peça em processos de torneamento : critério de fim de vida da ferramenta e fatores de influência**. Campinas.152 p. Tese de doutorado, FEM Universidade Estadual de Campinas,.

7.2 – Bibliografia Consultada

- AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A.C.S; LIRANI, J.(1981). *Princípios de engenharia de fabricação mecânica*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/Apostila/.
- OLIVEIRA, J.F.G.(1989). *Tópicos avançados sobre o processo de retificação*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/Apostila/.
- SCHWARZ, J.(1996). Superfinishing small components using superabrasives for all they are worth. *Abrasives*, p. 15-20, Fev/Mar.
- SHINTANI, K. et al.(1989). Optimum tool geometry of CBN for continuous turning of carburized steel. *International journal of machine tools & manufacture*. v.29, n.3, p.403-413.