UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru

Análise dos Erros Geométricos Causados pelas Diferentes Formas de Aplicação e Tipos de Fluidos, Visando a Otimização do Volume de Fluido de Corte na Retificação Cilíndrica Externa

Celso Naves de Souza

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU
2003

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru
FEB

ANÁLISE DOS ERROS GEOMÉTRICOS CAUSADOS PELAS DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO E TIPOS DE FLUIDOS, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO VOLUME DE FLUIDO DE CORTE NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA

CELSO NAVES DE SOUZA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU – SP
Fevereiro - 2003

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Número de chamada
Clas. T UNESP
PHA 5 714a
Tombo n.º 1096

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

ANÁLISE DOS ERROS GEOMÉTRICOS CAUSADOS PELAS DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO E TIPOS DE FLUIDOS, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO VOLUME DE FLUIDO DE CORTE NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA

BIBLIOTECA UNESP CAMPUS BAURU

CELSO NAVES DE SOUZA
Orientador: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
Co-orientador: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU – SP
Fevereiro - 2003

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

Souza, Celso Naves de
Análise dos erros geométricos causados pelas diferentes formas de aplicação e tipos de fluidos, visando a otimização do volume de fluido de corte na retificação cilíndrica externa / Celso Naves de Souza - - Bauru : [s.n.], 2003.
93 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

1. Aplicação otimizada. 2. Erros de circularidade. 3. Fluido de corte. 4. Bocais otimizados. I – Título. II – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA INDUSTRIAL

ATA Nº 034/2003.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *CELSO NAVES DE SOUZA*, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia vinte e seis de fevereiro de dois mil e três, às quatorze horas, no anfiteatro do prédio da Pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: Eduardo Carlos Bianchi do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Bauru, Presidente da Banca, Reginaldo Teixeira Coelho do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP e Manoel Henrique Salgado do Departamento de Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Bauru, a fim de proceder a argüição pública da Dissertação de Mestrado do candidato ***Celso Naves de Souza***, intitulada "ÁNALISE DOS ERROS GEOMÉTRICOS CAUSADOS PELAS DIFERENTES FORMAS DE APLICAÇÃO E TIPOS DE FLUIDOS, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO VOLUME DE FLUIDO DE CORTE NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA". O Professor Doutor Eduardo Carlos Bianchi, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em quarenta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora. Bauru, vinte e seis de fevereiro de dois mil e três. / . / . / .

" O importante não é estar aqui ou ali, mas ser.
E ser é uma ciência delicada, feita de pequenas
grandes observações do cotidiano,
dentro e fora da gente.
Se não executamos estas observações, apenas
estamos desaparecendo."

Carlos Drummond de Andrade

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Dedico este trabalho

Aos meus pais Eginaldo e Alzira, os quais acreditaram que a educação é a única forma de transformação do ser humano e por isso nunca mediram esforços para proporcionar uma educação de qualidade aos seus filhos.

Aos meus companheiros de viagem e de estudo.

Em especial à minha esposa Claudia pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus mais sinceros agradecimentos:

ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela orientação, incentivo, dedicação, apoio constante, amizade sincera, valiosas sugestões e pela confiança depositada no sucesso deste projeto;

ao Co-orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pelo incentivo e sugestões sempre pertinentes;

ao Prof. Dr. Manoel Henrigue Salgado, pela colaboração nas análises estatísticas;

ao Engenheiro Mecânico Rodrigo Daun Monici pela parceria neste trabalho;

ao Engenheiro Mecânico Rodrigo Catai e ao Estudante do 3º ano de Engenharia Mecânica, Aslan Sardinha, pela colaboração;

ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, e de forma especial, a todos os professores e funcionários do Departamento, que colaboram de alguma forma na realização desta pesquisa;

ao CEFET-PR/Unidade de Cornélio Procópio, pela liberação de horários, para o desenvolvimento deste trabalho;

à Profa. Marilú Martens de Oliveira, pela amizade;

A Deus, pela saúde e persistência concedida.

ÍNDICE

Lista de figuras..... 11
Lista de tabelas..... 13
Lista de abreviaturas..... 16
Lista de símbolos..... 18
Resumo..... 21
Abstract..... 22

Capítulo 1

1 Introdução..... 23
1.1 Objetivo..... 25
Motivação da pesquisa..... 25

Capítulo 2

2 Revisão da literatura..... 27
2.1 A influência dos componentes mecânicos nas máquinas-ferramentas na formação dos *Erros de Circularidade*..... 31
2.2 Classificação dos erros térmicos..... 32
2.3 Erros induzidos por distorções térmicas entre o rebolo e a peça retificada..... 36
2.4 Influência dos grãos desgastados na formação dos *Erros de Circularidade*..... 38
2.5 Influência do tipo de rebolo na formação dos *Erros de Circularidade*..... 39
2.6 Influência da dressagem do rebolo na formação dos *Erros de Circularidade*..... 40
2.7 *Erros de Circularidade* induzidos por desbalanceamento no rebolo..... 42
2.8 A importância do fluido de corte na prevenção dos *Erros de Circularidade*..... 44
2.9 A influência do sistema de aplicação de fluidos na formação dos erros de circularidade..... 47
2. 10 Principais características que influenciam o desempenho dos fluidos de corte utilizados em retificação..... 51

2.11 A influência da otimização de aplicação ou da Mínima Quantidade de Refrigeração (MQR) para a ocorrência dos Erros de Circularidade..... 55

Capítulo 3

3.1 Equipamentos utilizados..... 56
3.2 Especificação técnica dos rebolos utilizado nesse estudo..... 58
3.3 Especificação técnica dos fluidos de corte utilizado nesse estudo..... 59
3.4 Descrição do bocal convencional..... 60
3.5 Construção dos bocais otimizados para aplicação de fluido de corte..... 60
3.6 Preparo dos corpos de prova..... 62
3.7 Metodologia utilizada para medir as vazões dos bocais..... 63
3.8 Metodologia utilizada para medir os *Erros de Circularidade*..... 64

Capítulo 4

Resultados e discussões..... 67
4.1 Resultados das vazões dos bocais..... 73
4.2 Análise visual da ação dos bocais convencional e otimizado..... 74
4.3 Análise dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, com fluido de corte Emulsão e rebolo Óxido de Alumínio..... 75
4.4 Análise dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, com fluido de corte: Óleo Integral e o rebolo: Óxido de Alumínio..... 76
4.5 Análise dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, com fluido de corte: Emulsão e o rebolo: CBN..... 78
4.6 Análise dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, com fluido de corte Emulsão e o rebolo Óxido de Alumínio..... 79
4.7 Análise dos resultados obtidos usando somente os bocais de 3mm..... 81
4.8 Correlação dos erros de circularidade com energia específica de retificação..... 82
4.9 Comparação dos erros de circularidade com energia específica de retificação... 83

Conclusões..... 85
Sugestões para trabalhos futuros..... 87
Referências Bibliográficas..... 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Análise do processo de retificação (Silva 1994 com modificações)..... 28

Figura 2.2 Exemplo de uma peça com *Erro de Circularidade* (Taylor-Hobson 2001)..... 29

Figura 2.3 Representação dos pontos em que estão os elementos de máquinas, bem como sua influência, que pode ser única ou combinada (Domez 1995 com alterações)..... 30

Figura 2.4 Principais fontes de calor interno, onde os elementos de máquinas atuam como fontes produtoras de calor..... 32

Figura 2.5 Exemplifica a distorção térmica interna gerada por esses componentes: (a) exemplifica as distorções térmicas internas; (b) exemplifica as distorções térmicas externas, influenciadas pelo, meio ambiente ou outras fontes de calor externo..... 33

Figura 2.6 Condução térmica que ocorre em uma peça. (Malkim 1989, com alterações)..... 35

Figura 2.7 Formação do cavaco por um grão abrasivo, o qual desliza sobre a superfície gerada, apresentando um desgaste de área de topo (Malkin, 1989, com alterações)..... 37

Figura 2.8 Região de contato dressador / rebolo (Oliveira, 1988)..... 41

Figura 2.9 (a) Exemplifica uma peça retificada com rebolo balanceado (b) Exemplifica uma peça retificada com rebolo desbalanceado. (Silva, 1994)..... 43

Figura 2.10 Bocal de formato arredondado 48

Figura 2.11 Ilustração da retificação plana e do modelamento térmico (Guo e Malkim, 1005, com modificações)..... 49

Figura 2.12 Ilustração da retificação plana e modelamento térmico (Guo e MALKIM, 1995 com modificações..... 52

Figura 3.1 Foto da Máquina retificadora cilíndrica (CNC)..... 55

Figura 3.2 Máquina TAYROND 31C, que entra em contato com a peça a ser medida. (MANUAL DIDÁTICO Taylor- Hobson. 2002)..... 57
Figura 3.3 Bocal convencional 60
Figura 3.4 Bocal de 3mm de diâmetro de saída - dimensões básicas..... 61
Figura 3.5 Bocal de 4mm de diâmetro de saída -dimensões básicas 61
Figura 3.6 Bocal de 5mm de diâmetro de saída -dimensões básicas..... 61
Figura 3.7 (A) - Corpo de prova no estado geométrico inicial
(B) - Corpo de prova no estado geométrico final com tratamento térmico
C) – Detalhamentos do local onde iram ser realizados as medições..... 63
Figura 3.8 Representa a colocação da haste de medição em contato com a peça..... 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades de lubrificação e refrigeração dos mais comuns tipos de fluido de corte em retificação. Bennett, [sd]..... 46

Tabela 4.1 Resultado das medições, usando BOCAL: 5mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral, REBOLO: Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 67

Tabela 4.2 Resultado das medições, usando BOCAL: 4mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral, REBOLO: Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 68

Tabela 4.3 Resultado das medições, usando BOCAL: 3mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 68

Tabela 4.4 Resultado das medições, usando BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 68

Tabela 4.5 Resultado das medições, usando BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN (todas as medidas em µm)..... 69

Tabela 4.6 Resultado das medições, usando BOCAL: 5mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN (todas as medidas em µm)..... 69

Tabela 4.7 Resultado das medições, usando BOCAL: 4mm e FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 69

Tabela 4.8 Resultado das medições, usando BOCAL: 3mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 70

Tabela 4.9 Resultado das medições, usando BOCAL: 5mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 70

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela 4.10 Resultado das medições, usando BOCAL: 4mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 70
Tabela 4.11 Resultado das medições, usando BOCAL: 3mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 71
Tabela 4.12 Resultado das medições, usando BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em µm)..... 71
Tabela 4.13 Resultado das medições, usando BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 71
Tabela 4.14 Resultado das medições, usando BOCAL: 5mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 72
Tabela 4.15 Resultado das medições, usando BOCAL: 4mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 72
Tabela 4.16 Resultado das medições, usando BOCAL: 3mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão, REBOLO Óxido de Alumínio (todas as medidas em µm)..... 72
Tabela 4.17 Valores das vazões obtidas pelo sistema de refrigeração da máquina retificadora cilíndrica CNC..... 73
Tabela 4.18 Resultado estatístico dos bocais: 3mm, fluido de corte: Emulsão e o de Ó xido de Alumínio..... 76
Tabela 4.19 Resultado estatístico dos bocais: 3mm, fluido de corte: Óleo Integral e o rebolo: Óxido de Alumínio..... 77
Tabela 4.20 Resultado estatístico dos bocais: 3mm, fluido de corte: Emulsão e o rebolo: CBN..... 79
Tabela 4.21 Resultado estatístico dos bocais: 3mm, fluido de corte: Óleo Integral e o rebolo: CBN..... 80

Tabela 4.22 Resultado estatístico dos bocais: 3mm..... 82

LISTA DE ABREVIATURAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

PITE - Position Independent Thermal Error

PDTE - Position Dependent Thermal Error

5OiOx - BOCAL de 5mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: óxido de alumínio

4OiOx - BOCAL de 4mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: óxido de alumínio

3OiOx - BOCAL de 3mm, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: oxido de alumínio

CBN - NITRETO CÚBICO DE BORO

COiOx - BOCAL convencional, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: oxido de alumínio

COiC - BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN

5OiC - BOCAL: 5mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN

4OiC - BOCAL: 4mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN

3OiC - BOCAL: 3mm , FLUIDO DE CORTE: Óleo Integral e REBOLO: CBN

5EC - BOCAL: 5mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: CBN

4EC - BOCAL: 4mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: CBN

3EC - BOCAL: 3mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: CBN

CEC - BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: CBN

CEOx - BOCAL: convencional, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: óxido de alumínio

5EOx - BOCAL: 5mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: óxido de alumínio

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

4EOx - BOCAL: 4mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: óxido de alumínio

3EOx - BOCAL: 3mm, FLUIDO DE CORTE: Emulsão e REBOLO: óxido de alumínio

LISTA DE SÍMBOLOS

a [mm] - penetração do rebolo

A_a [mm] . Profundidade de dressagem

A_b [mm]- área de saída do bocal

a_d [μm] - penetração de dressagem

As [mm] . Avanço do dressador

a_t[μm] - profundidade de corte para impressão do perfil do rebolo desgastado

b [mm]- largura de retificação

B_b [mm] . Largura do dressador

b_d [mm]- largura de atuação do dressador

$C_{máquina}$. Rigidez da máquina

C_r - razão de contração

d [Ângstron]- distância interplanar

D[mm]- diâmetro da mangueira de alimentação de fluido de corte

d_1 [mm]- diâmetro da coroa 1

d_2 [mm]- diâmetro da coroa 2

D_n[mm] - diâmetro de saída do bocal de fluido de corte

d_r[μm]- desgaste radial do rebolo

d_s [mm]- diâmetro do rebolo

d_t [mm]- diâmetro do tarugo

d_w[mm] - diâmetro da peça

EPI - equipamentos de proteção individual

f_a[μm] . Erro de forma da peça

F_c [N]- força de corte

$Ft_{c\ (instant)}$ [N]- força de corte instantânea

G - Relação Z_w / Z_s

h_a [kcal/h m^2 °C]- coeficiente de película na região de aplicação de fluido de corte

h_b [kcal/h m^2 °C] - coeficiente de película na região oposta a de aplicação de fluido de corte

h_{eq} [mm]- espessura equivalente de corte

I - Peças por vida do rebolo

I_w[mm] - Comprimento da peça

l_c [mm]- comprimento de contato

n_s[rpm] - Rotação do rebolo

N_s [N]- Potência de usinagem

P_e [W]- potência elétrica

Q - Relação V_s/V_w

Q [m^3/s]- vazão de fluido de corte

Rt_{ist} [μm]- Rugosidade efetiva

Rt_{so} [μm]- Rugosidade desejada

R_{tw} [μm]- Rugosidade nominal

S'_{cf} - Vel. de avanço/acabamento

S'_{cv} - Vel. de avanço/desbaste

S_d[mm] - passo de dressagem

T [N.m]- torque aplicado

t [s]- tempo

t_a - Tempo de centelhamento

t_{ap} - Centelhamento com rebolo diamantado

T_d - Tolerância no diâmetro da peça

th_{so} - Tempo calculado na operação de retificação

th_{st} - Tempo real da operação de retificação

T_t - Tolerância no comp. da peça

T_t - Tolerância no comprimento da peça

u [j/mm^3]- energia específica de retificação

U_a - Grau de tempera da peça

u_{ch}[j/mm^3] - energia referente ao lascamento

U_d - grau de recobrimento

u_{pl} [j/mm^3]- energia de deslocamento de material por deformação plástica

u_{sl} [j/mm^3]- energia de deslizamento grão-peça

V* - razão de velocidades

$V'1_{max}$ - Volume específico do cavaco

V''_{G1} - Volume de cavaco/segundo

V_d - Velocidade do dressador

v_f [mm]- velocidade de mergulho

v_j [mm]- velocidade do jato de fluido de corte

V_r [m/s] - Velocidade do rolo dressador

V_s[m/s] - Velocidade de corte do rebolo

v_s [m/s]- velocidade de corte

V_w - Velocidade de corte da peça

v_w [m/s]- velocidade da peça

Z [mm]- Sobremetal da peça

Z_s [mm]. Volume de cavaco removido

SOUZA, C.N. (2003). *Análise dos Erros Geométricos Causados Pelas Diferentes Formas de Aplicação e Tipos de Fluidos, Visando a Otimização do Volume de Fluidos de Corte na Retificação Cilíndrica Externa*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 93 p.

RESUMO

Devido à elevada competitividade industrial, às exigências de leis de proteção ambiental, à redução de custos e a outros problemas tecnológicos entre as empresas e os seus produtos, a indústria mecânica se vê obrigada a preocupar-se com detalhes até então não considerados e com isso preocupar-se com técnicas mais precisas e refinadas. Nesse contexto, pode-se citar os *Erros de Circularidade*. O uso dos de fluidos (óleo integral e emulsão), dos rebolos (CBN e óxido de alumínio) na retificação de corpos de prova do aço VC 131 com 60HRc mostraram melhorias significativas no processo de retificação. Para a introdução do fluido de corte, foram utilizados o bocal convencional e os bocais com furo de 5mm, 4mm e 3mm. Ficou comprovado que o conjunto bocal 3mm, óleo integral e rebolo CBN, em comparação com o bocal convencional, mesmo fluido e mesmo rebolo, ocupou somente 17,9% do volume de fluido bem como proporcionou uma diminuição do *Erro de Circularidade* em 1.072% vezes menor que o bocal convencional.

Pode-se considerar que com o desempenho do conjunto acima, este resultado é de suma importância, quando se analisam os benefícios ambientais, financeiros e segurança, reduzindo assim os custos de manufatura e deixando os produtos mais competitivos.

Palavra chave: Aplicação Otimizada, Erros de Circularidade, Fluido de corte.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

SOUZA, C.N. (2003). *Analysis of the Geometrical Errors Due to Different Forms of Application and Types of Fluids, Seeking the Optimization of the Fluids Volume on External Cylindrical Grinding Process,* Master Degree Dissertation, State University of Sao Paulo, UNESP, 93 p.

ABSTRACT

Concerning the high competitiveness, the environmental protection stamp obtainment, cost reduction and other technological problems among companies and their products, the mechanical industry is forced to worry about details, which are not perceived to our daily routine. It is mentioned, in this context, the *Circularity Error*. The grinding of the workpiece (VC 131) with 60HRc using two well (CBN and oxide of aluminum) and two cuting fluid types (integral oil and emulsion) has shown improvement on grinding process. The conventional nozzles of 5mm, 4mm and 3mm diameter respectively were used to introduce the cutting fluid on the process. The set composed by 3mm diameter nozzle, integral oil and CBN abrasve showed a statistically reduction of up to 82,1% times the volume of cutting fluid compared to the conventional nozzle. The *Circularity Error* has shown a considerable reduction of 1.072% times with the same set. The results obtained in this work are of high importance for environmental protection, safety and cost reduction in the grinding process.

Keyword: application of court fluid, circularity error and nozzle.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Segundo Malkin (1989), o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia para a remoção de material. Energia essa que transformada em calor se concentra dentro da região de corte. As elevadas temperaturas podem produzir situações em que ocorrem a queima da superfície o aquecimento superficial e transformações microestruturais, possibilitando a retêmpera do material, já que a maioria dos processos de retificação ocorre em aços temperados, com a formação de martensita não-revenida, gerando tensões residuais indesejáveis e incontroláveis, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado. Além disso, a expansão e a contração não controlada da peça mecânica durante operação de retificação são grandes formadores dos *Erros de Circularidade*.

Segundo Kovacevic e Mohan (1995), do percentual de desgaste volumétrico de um rebolo convencional, apenas 10% ocorrem durante a usinagem propriamente dita e 90% perdido durante as operações de dressagem, afiação e avivamento dos grãos. As taxas de retificação, hoje utilizadas, são limitadas pelas

temperaturas máximas permissíveis no processo, as quais, quando ultrapassadas, podem levar à deterioração da qualidade final da peça produzida.

Conforme Webster e Ciu (1995), o bocal tradicional geralmente tem uma ou duas paredes internas convexas, o que ocasiona uma tendência de separação das lâminas geradas internamente. O fluxo separado tem um elevado nível de turbulência e pressão, o que irá afetar significativamente a convergência do jato. Webster propõe o projeto de um bocal circular que tenha paredes internas côncavas, o que minimiza o surgimento da turbulência.

De acordo com Novaski e Dörr (1999), Machado e Costa (2002) *apud* Sreejith e Ngoi (2000), os custos com refrigeração em um processo produtivo apresentam até 20% do custo de fabricação, representando um valor expressivo comparado aos gastos destinados à ferramenta que apresenta de 2% a 4%.

Segundo Guo e Malkin (1992), a eficiência na utilização dos fluidos de corte está na faixa de 5 a 30%. Devido a ineficiente lubrificação e refrigeração da interface rebolo-peça, tem-se como resultado um aumento do número de afiações do rebolo (dressagem ou perfilamento, dependendo do tipo de rebolo utilizado) durante uma dada operação de retificação. Com isso, tem-se um desgaste prematuro do rebolo.

Segundo Minke (1999), a taxa de geração de calor ocorrida durante o processo de retificação é reduzida pela ação direta dos fluidos de corte, este fluido se aplicado corretamente atuará de maneira decisiva para a não ocorrência de danos térmicos superficiais à peça.

unesp

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo verificar se os bocais propostos no projeto de Webster (1995), em comparação com o bocal convencional, podem minimizar a formação dos *Erros de Circularidade* na retificação do aço VC 131 com 60 HRc, mantendo inalteradas as condições estabelecidas no equipamento, através da utilização de quatro tipos de bocais: um convencional (original da máquina retificadora); e os demais de 5 mm, 4 mm e de 3 mm de diâmetro de saída do fluido, fiéis ao projeto de Webster (1995); dois tipos de rebolo (CBN e Óxido de Alumínio) e dois tipos de fluido de corte (emulsão e óleo integral.).

Assim procurar-se-á analisar estes resultados e verificar se houve mudanças significativa nos *Erros de Circularidade*.

1.2 MOTIVAÇÃO DESTA PESQUISA

De acordo com Webster e Ciu (1995), a definição de um modo eficiente de aplicação dos fluidos é uma forma de encontrar resultados mais eficientes que podem ser tão importantes quanto à seleção das especificações do rebolo de usinagem.

Conforme Malkin *apud* Webster e Ciu (1995), a correta aplicação de fluidos reduzirá a queima da peça de trabalho pela diminuição da energia específica e de acordo com Guo e Malkin *apud* (Webster e Ciu, 1995), reduzirá o contato da zona termicamente afetada. O fluido à base de água (emulsão) torna a aplicação à alta pressão muito mais difícil, se comparados com óleos integrais, por causa da menor viscosidade, que promove um jato disperso, quando utilizado com bocais convencionais de refrigeração. Há que se ressaltar que os fluidos de corte estão cada vez mais requisitados no contexto mundial.

unesp

Segundo Rios (2002), um milhão de litros de água poderá ser contaminado por apenas um litro de óleo, visto que o processo de retificação utiliza grande volume de fluido de corte, sendo os mesmos descartados em sistema de esgoto doméstico, afetando diretamente o meio ambiente.

De acordo com Novaski e Dörr (1999), a usinagem com a utilização da mínima quantidade de refrigeração (MQR) vem sendo um assunto abordado freqüentemente por vários ramos da indústria.

Com o objetivo de encontrar uma solução tecnológica que venha a minimizar este problema, procurar-se á com este trabalho a racionalização do volume de fluido de corte.

Para se alcançar os objetivos que se propõem estas pesquisas, o trabalho será organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 - Revisão da literatura.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões.

Capítulo 5 - Conclusões.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

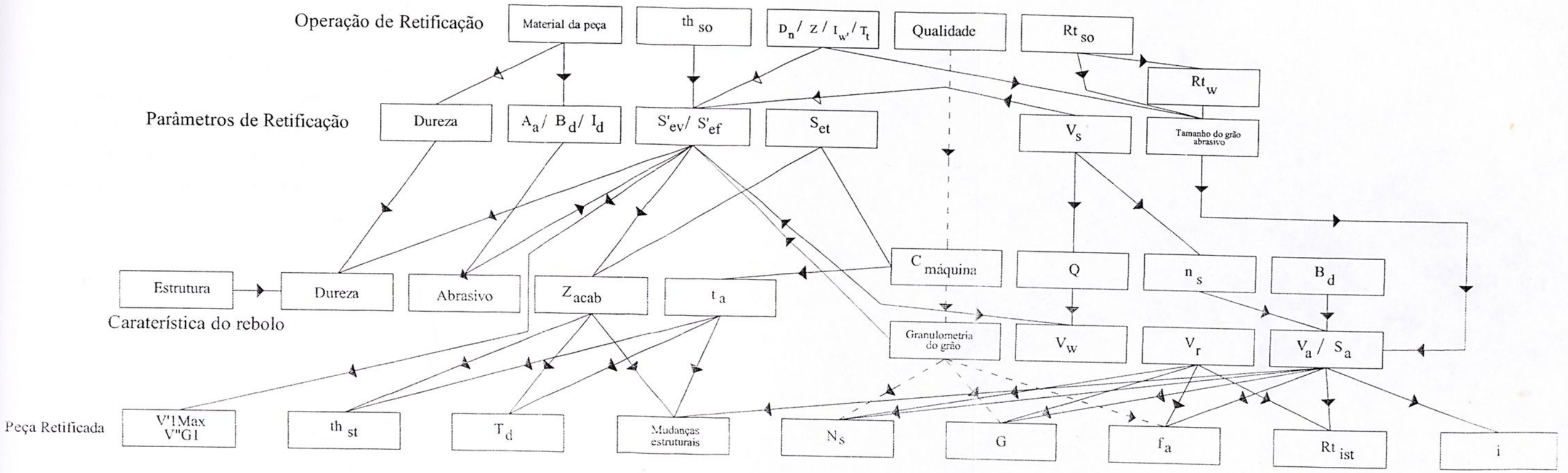
Segundo Bianchi (1999), Junior (1996) e Silva (1994), o processo de retificação é conhecido como um dos mais complexos processos de usinagem, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Caracteriza-se por ser um processo de usinagem por abrasão dos grãos cortantes. A figura 2.1 representa o grau de complexidade dessa operação, (linha tracejada) onde a qualidade da peça pode ser influenciada pela rigidez da máquina-ferramenta, da granulomeria do grão, da potência de usinagem, da relação G e do erro de forma da peça, na figura 2.1 pode-ser ver nitidamente que cada variável poderá ter uma influência direta ou combinada e assim gerar o *Erro de Circularidade.*

Segundo Júnior (1996), a retificação é usada em operações de acabamento, nas quais a qualidade do material retificado e os *Erros de Circularidade* são importantes e conseqüentemente controlados.

Segundo Shaw (1995), uma peça nunca é perfeitamente cilíndrica. Nesta frase, Shaw afirma que em todas as peças podem estar presentes os *Erros de Circularidade*, que é um dos principais causadores dessa não perfeição cilíndrica.

unesp

ANÁLISE DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO



LEGENDA

A_a = Profundidade de dressagem
B_b = Largura do dressador
$C_{máquina}$ = Rigidez da máquina
d_b = Diâmetro da peça
f_a = Erro de forma da peça
G = Relação Z_w / Z_s
I = Peças por vida do rebolo
I_w = Comprimento da peça
N_s = Potência de usinagem
n_s = Rotação do rebolo
Q = Relação V_s/V_w
Rt_{ist} = Rugosidade efetiva
Rt_{so} = Rugosidade desejada
R_{tw} = Rugosidade nominal
S_a = Avanço do dressador
S'_{ef} = Vel. de avanço/acabamento
S'_{ev} = Vel. de avanço/desbaste
T_d = Tolerância no diâmetro da peça
T_t = Tolerância no comp. da peça
t_a = Tempo de centelhamento
t_{ap} = Centelhamento com rebolo diamantado
$V'1_{max}$ = Volume específico do cavaco
V''_{G1} = Volume de cavaco/segundo
V_d = Velocidade do dressador
V_r = Velocidade do rolo dressador
V_s = Velocidade de corte do rebolo
V_w = Velocidade de corte da peça
Z = Sobremetal da peça
Z_s = Volume de cavaco removido
th_{st} = Tempo real da operação de retificação
th_{so} = Tempo calculado na operação de retificação
T_t = Tolerância no comprimento da peça
U_a = Grau de tempera da peça

Figura 2.1 - Análise do processo de retificação (Silva 1994 com modificações)

Segundo Jedrzejewski (1997), o *Erro de Circularidade* pode ser entendido como qualquer divergência entre a peça construída e a peça teoricamente exigida com tolerância especificada. A quantidade dos erros em uma máquina dá uma medida de sua precisão.

Dos tipos de erros encontrados em uma peça é o *Erro de Circularidade* (figura 2.2) que, segundo ASME (1982), ocorre quando seus raios opostos são diferentes em qualquer posição da superfície da peça. Eles estão presentes nas peças cilíndricas que passaram por alguma etapa da manufatura, muitas delas prontas para serem usadas:

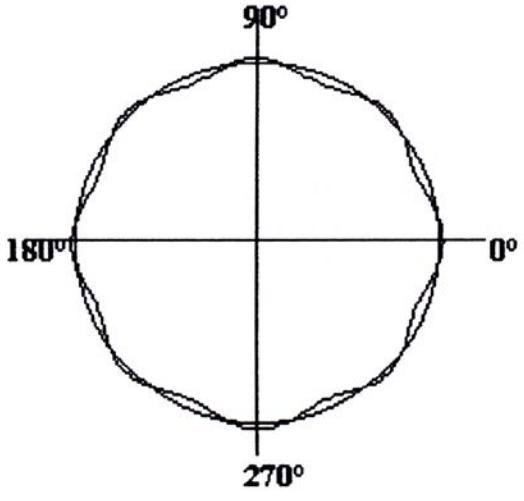


Figura 2.2 – Exemplo de uma peça com *Erro de Circularidade* (Taylor-Hobson 2001).

Na operação de retificação é importante que sejam conhecidos os fatores que influenciam nos *Erros de Circularidade* e também a relação entre eles. A figura 2.3 exemplifica alguns desses fatores e demonstra que esses erros ocorrem com maior freqüência durante a manufatura da peça.

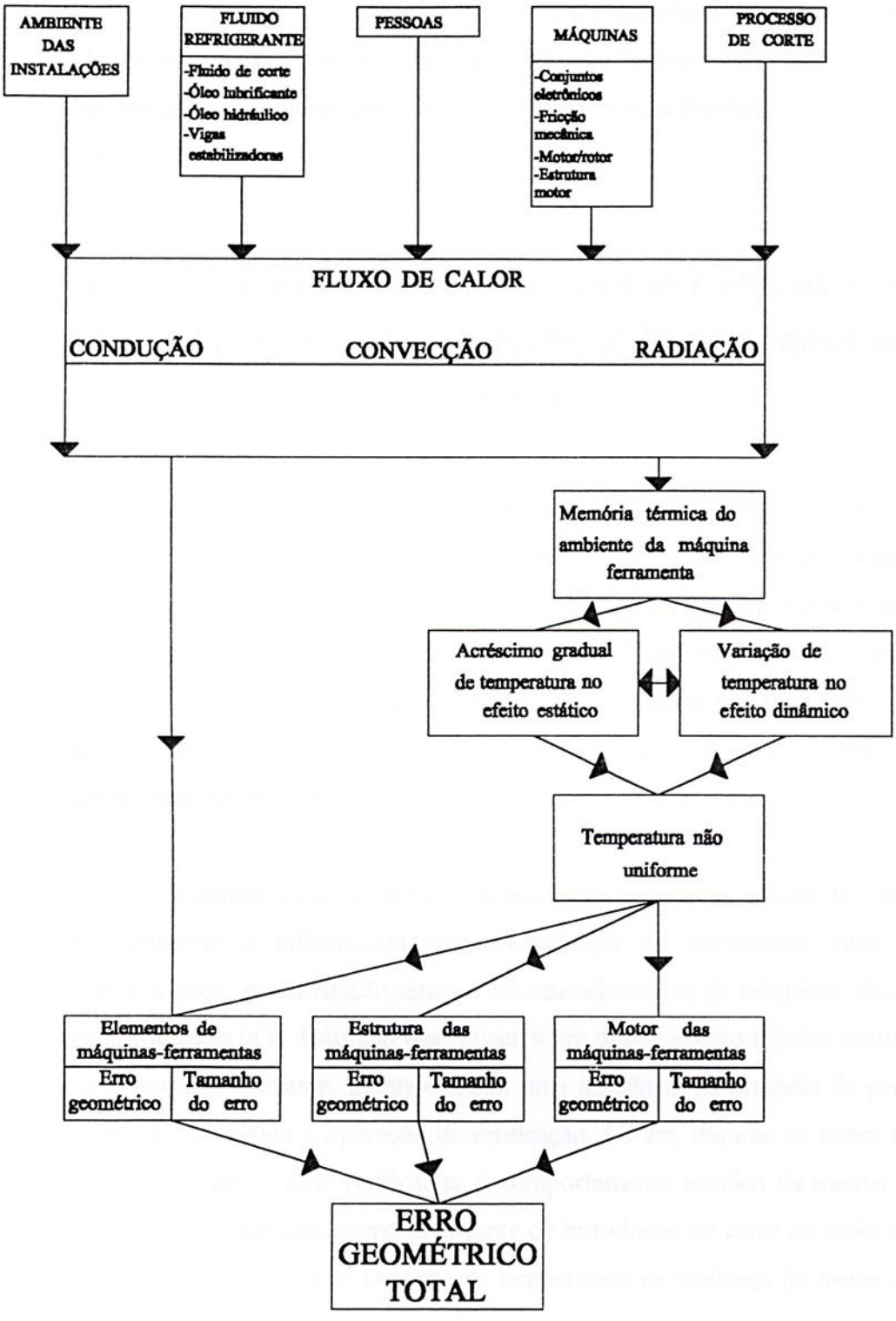


Figura 2.3 - Diagrama dos efeitos térmico em uma máquina-ferramenta
(Domez 1995 com alterações)

A figura 2.3 nos mostra como o calor influência na formação dos *Erros de Circularidade,* onde esse calor e produzido de forma não uniforme nas máquinas-ferramentas, influenciando todo o conjunto para a formação do *Erro de Circularidade.*

2.1 A INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES MECÂNICOS NAS MÁQUINAS-FERRAMENTAS NA FORMAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE

Segundo Donmez (1985), Evans (1996), Ni (1997) e Slocum (1992), os componentes das máquinas retificadoras são fabricados por outras máquinas-ferramentas (tornos, fresas, furadeiras, retificadoras entre outras), que também produzem peças com *Erros de Circularidade*. Essas peças, darão origem a novas máquinas-ferramentas que, em geral, são compostas por uma placa ou castanha com três pontas, colunas, fusos, vários elementos de deslizamentos e ferramentas estáticas ou rotativas.

Segundo Yuan (1998), a precisão da peça a ser obtida em uma máquina-ferramenta é influenciada por divergências do movimento entre a ferramenta e a peça por dilatação térmica em seus elementos de máquinas. Essas dilatações produzem uma distorção que levam a um deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta cortante, gerando assim uma influência na precisão da peça que está sendo submetida à operação de retificação. Porém, durante os testes de aceitação da máquina, é raro verificar-se o comportamento térmico da mesma, a ser observado separadamente como uma fonte de introdução de calor ao meio em que está a máquina-ferramenta. O efeito da temperatura na mudança da forma da máquina e seus componentes podem ser determinados medindo-se o comportamento dos *Erros Circularidade* durante um dia de produção.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Ainda segundo Yuan (1998), pode-se verificar algumas distorções ocasionadas pelo efeito térmico dos elementos de máquinas.

a) rolamentos e mancais
b) engrenagens
c) polias e correias
c) freios e embreagens
d) bombas e motores
e) guias e fusos
f) ação do rebolo

Neste contexto, pode-se citar as fontes externas de calor (figura 2.5 b), como uma grande formadora de distorções de forma de máquinas-ferramentas, com baixo índice de rigidez. A figura 2.4 representa os pontos em que estão os elementos de máquinas, bem como sua influência que pode ser única ou combinada.

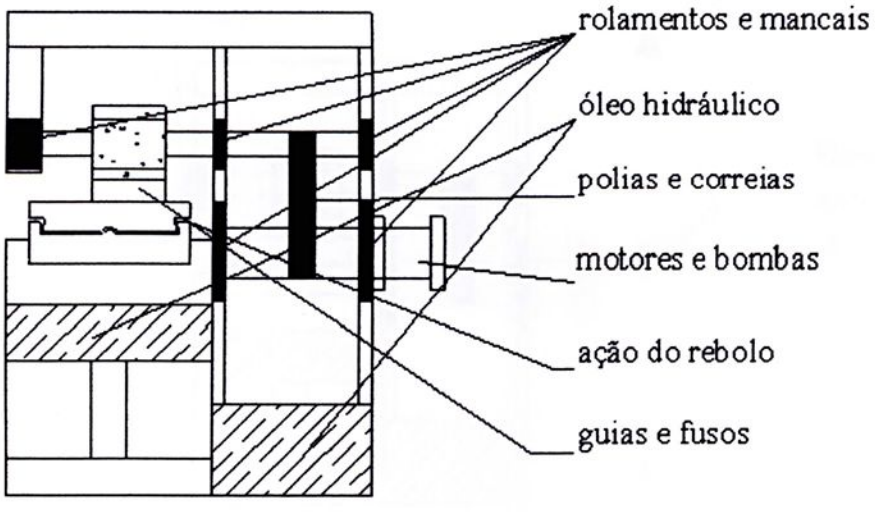
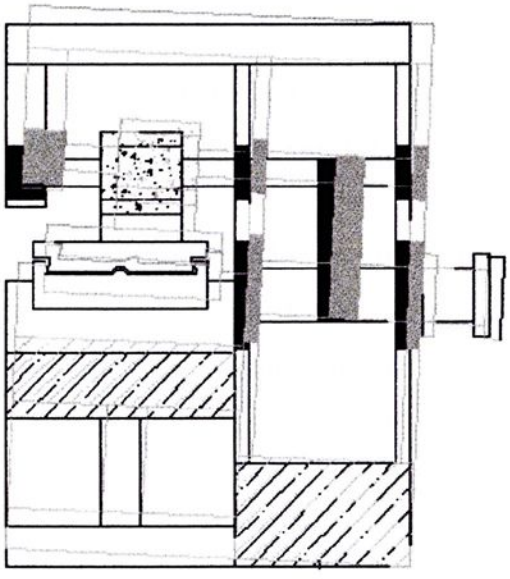
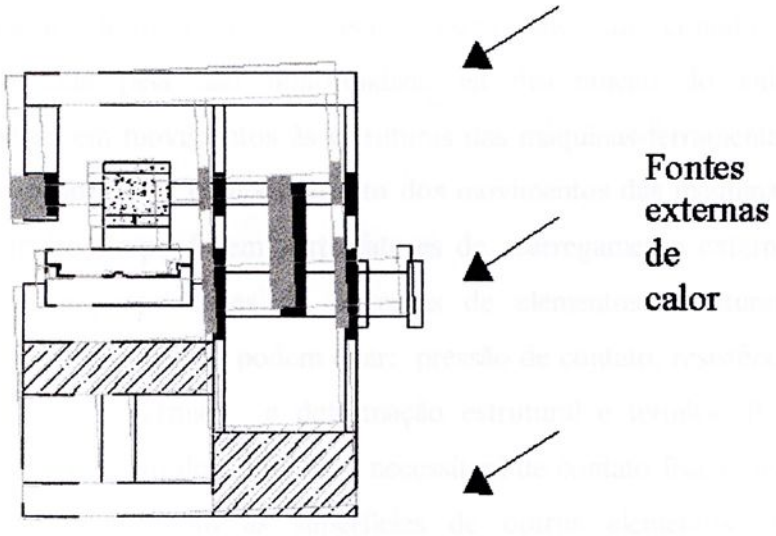


Figura 2.4 – Principais fontes de calor interno, onde os elementos de máquinas atuam como fontes produtoras de calor (Yuan 1998).

A figura 2.5 exemplifica a distorção térmica gerada por esses componentes: (a) exemplifica as distorções térmicas internas; (b) exemplifica a distorção térmica externa, influenciada pelo meio ambiente ou outras fontes de calor externo.



(a) distorção térmica por fonte interna



(b) distorção térmica por fonte externa

Figura 2.5 - Fontes interna e externa de calor. (Yuan 1998, com alterações).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ERROS TÉRMICOS

Segundo Yuan (1998), Freeman (1997), Ni (1987) e Blackshaw (1997), em geral, os erros térmicos podem ser divididos em duas categorias: na primeira, são os erros que ocorrem como uma função da temperatura, mas não alteram a posição do eixo. Esses erros que efetivamente provocam uma mudança na forma da máquina-ferramenta, são conhecidos como erros térmicos de posição independentes – *Position Independent Thermal Error* - (PITE).

Na segunda categoria estão os erros que também mudam em função da temperatura, alterando a posição de eixo em relação à máquina. Eles mudam o posicionamento linear da máquina efetivamente e são conhecidos como erros térmicos dependentes de posição – *Position Dependent Thermal Error* - (PDTE).

Segundo Bryan (1990), Evans (1996), esta teoria é baseada no conhecimento do fato de que a distribuição de pressão de contato transfere calor de um elemento estrutural para outro. De acordo com DeMeter (1997) e Donmez (1985), a deformação térmica de elementos estruturais em contato é significativamente afetada pela não uniformidade na distribuição do calor transferido pelas peças em movimentos às estruturas das máquinas-ferramentas. Dois grupos de fatores afetam o comportamento dos movimentos das máquinas-ferramentas. Do primeiro grupo fazem parte fatores de carregamento externo, textura de superfície e propriedades de materiais de elementos estruturais, enquanto que no o segundo grupos podem citar: pressão de contato, resistência de contato térmico, campo térmico e deformação estrutural e térmica. Para efetivamente ocorrer à operação de retificação, necessitará de contato físico entre seus elementos de máquina com as superfícies de outros elementos que apresentam uma certa rugosidade de acabamento, formando assim o atrito,



gerando calor, dilatação e deformação térmicas.

Segundo Malkim (1989), a formação do calor tem sua maior intensidade no contato rebolo peça e este calor penetra de fora para dentro da peça a ser retificada, conforme ilustrado na figura 2.6, e muitas vezes o fluido não consegue chegar no local onde esta acontecendo à operação de retificação, deixando o calor penetrar em uma parte da peça, acontecendo assim à formação dos *Erros de Circularidade.*

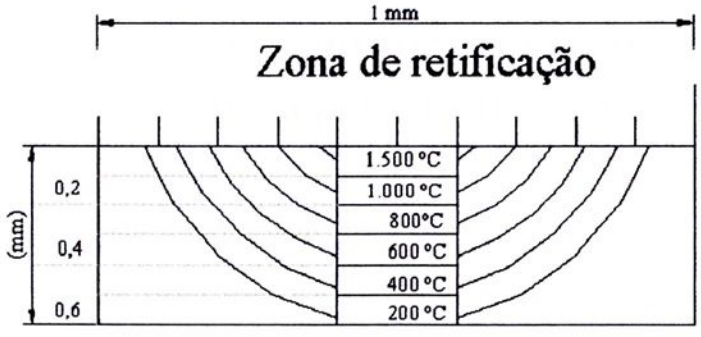


Figura 2.6 – Condução térmica que ocorre em uma peça. (Malkim 1989, com alterações).

Conforme Makim (1989), o mecanismo de transferência de calor para a máquina-ferramenta mostra que a condução térmica é o único modo significante de transferência de calor. A resistência nos contatos dos movimentos é assim controlada pela configuração de contato. Todos estes fatores dependem da pressão de contato local e, conseqüentemente, o mecanismo de transferência de contato térmico deveria ser expresso como posição dependente e não como um valor comum.

Ainda segundo Malkin (1989), quando há uma mudança na

configuração do local de contato, ocorre uma pequena transformação em uma parte da superfície, modificando a textura naquele local. Devido à natureza do carregamento mecânico e térmico na estrutura, a distribuição da pressão de contato efetivamente não é uniforme. A não uniformidade no contato da pressão causa distorções na resistência que, conseqüentemente, provoca distorções no fluxo de calor. O fluxo de calor resultante gera tensões de contato térmicas que alteram a distribuição de pressão existente.

2.3 ERROS INDUZIDOS POR DISTORÇÕES TÉRMICAS ENTRE O REBOLO E A PEÇA RETIFICADA

Para Vieira, et al (1999) *apud* Malkim (1995), o *Erro Geométrico* é devido à zona afetada pelo calor (ZTA). Ao se retificar uma peça, pretende-se que uma série de benefícios esteja agregada. Exemplos desses benefícios. São, o alívio de tensões localizadas e a correção dos desvios dimensionais.

Ainda segundo os pesquisadores, o mecanismo de remoção do cavaco na retificação tem três fases conforme ilustrado na figura 2.7:

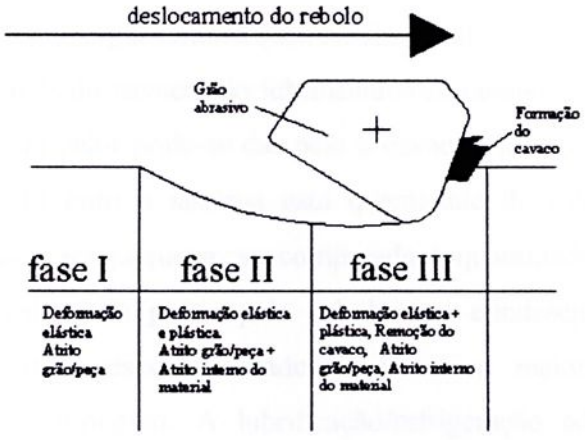


Figura 2.7 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, o qual desliza sobre a superfície gerada, apresentando um desgaste de área de topo (Malkin, 1989, com alterações).

- Fase I: onde ocorrem deformação elástica e atrito entre o grão e a peça.

- Fase II: onde ocorrem deformações elástica e plástica, atrito interno dos grãos da estrutura do material.

- Fase III: onde ocorrem as deformações elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça, o atrito interno do material e, finalmente, a separação do material que origina o cavaco.

A extensão de cada uma dessas fases depende de fatores relacionados às características de agressividade do rebolo (grau de afiação do grão abrasivo) e aos parâmetros de operação utilizados (profundidade de corte e velocidade de corte e da peça).

Essas três fases, que podem ser observadas na figura 2.7, são fontes

de transformação de parte da energia mecânica envolvida no processo de retificação em energia térmica (calor). Esse calor pode ser removido da região de contato através do cavaco, do lubrificante/refrigerante, pela peça ou pelo rebolo. A remoção do calor pode-se dar pelo o cavaco, mas por ser de menor espessura, se comparado com o sistema esta quantidade de calor acumulada no cavaco também passa ser pequena, se comparada à quantidade de calor restante, e a difusão do calor pela peça e pelo rebolo, que é indesejável, fica, portanto, para o fluido de corte a responsabilidade de remover a maior parte de energia térmica envolvida no processo. A lubrificação/refrigeração adequada para realizar tal tarefa deve ser abundante, com grande pressão e direcionada diretamente na interface rebolo/peça, e não para o rebolo ou para a superfície da peça, que fica após a região de contato.

2.4 INFLUÊNCIA DE GRÃOS DESGASTADOS NA FORMAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE

Apesar da remoção de material ocorrer principalmente por formação de cavaco, como relatado anteriormente, uma grande parte da energia de retificação é direcionada a outros mecanismos distintos da formação do cavaco. Malkin (1989) afirma que, um destes mecanismos pode envolver grãos abrasivos que perderam sua capacidade de retirar cavacos, mas ganharam uma capacidade efetiva em produzir calor (chamados de grãos cegos), com os topos dos grãos achatados, deslizando contra a peça, sem remover nenhuma quantidade de material. Este cegamento dos grãos, com perda da aresta cortante, pode ser gerado por processos de dressagem pouco agressivo, por desgaste do grão abrasivo durante o processo de corte ou por adesão do material usinado na superfície do rebolo. A presença de grãos com área de topo desgastada, caracterizada pelas marcas estriadas observadas na direção de corte e na superfície retificada, indica



que parte da energia gasta na retificação deve-se ao deslizamento dos grãos "cegos" contra a peça. Existe uma relação direta entre o aumento das forças de retificação (tangencial e normal) com o aumento da área de desgaste do topo dos grãos. As forças de usinagem aumentam linearmente com o aumento do desgaste de área do topo dos grãos, até atingir um ponto crítico, que ocasiona a queima da peça. Segundo Malkin e Cook (1989), as forças de usinagem associadas à energia específica de retificação, podem ser constituídas de componentes como corte e deslizamento, considerando que o desgaste do topo do grão é influenciando pelas condições de dressagem, pela grade do rebolo (dureza do ligante) e pela influência do tipo de fluido de corte utilizado.

2.5 INFLUÊNCIA DO TIPO DE REBOLO NA FORMAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE

Para Tönshoff e Grabner (1984) e Vansevenat (1989) *apud* Malkin (1985), os danos térmicos gerados quando da retificação com rebolos superabrasivos de CBN são, geralmente, inferiores aos que ocorrem quando da retificação com rebolos convencionais. Utilizando-se rebolos de CBN, a queima da peça raramente ocorre e as tensões residuais são, predominantemente de compressão. Isto indica que menores temperaturas de retificação são geradas na região de corte. Essas são atribuídas, parcialmente, à maior dureza de seus grãos (dureza Knoop do grão de CBN é de 4.500 kg/mm^2 e do grão de Al_2O_3 é de 2.500 kg/mm^2), o que mantém a capacidade de corte do rebolo, diminuindo o desgaste do mesmo, reduzindo as parcelas de energia relativas ao arraste (u_{pl}) e ao deslizamento de grãos cegos (u_{sl}). Todavia, tem-se atribuído a menores temperaturas geradas na retificação com rebolos de CBN à maior condutividade térmica de seus grãos abrasivos, quando comparadas com os de óxido de alumínio



(condutividade térmica do grão de CBN é de 13.813 KJ/°C.cm.s e do grão de Al_2O_3 é de 335 KJ/°C.cm.s. Vale ressaltar que o rebolo de CBN tem uma capacidade de retirar calor 41,25 superior que o rebolo de Óxido de Alumínio). A retificação com o rebolo de CBN retira uma fração do calor gerado que é transportado para fora da zona de retificação pela boa conditividade da ferramenta abrasiva, ao invés do mesmo fluir pela peça.

Segundo Kohli et al (1995), estudos comprovam o melhor desempenho dos rebolos de CBN, o que permitira determinar a partição da energia gerada quando da realização de operações de retificação com rebolos de Al_2O_3 e CBN. Utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, onde as temperaturas medidas foram comparadas com aquelas obtidas pelas formulações teóricas, com distribuição triangular de fluxo de calor, observou-se que entre 60 - 75% da energia gerada durante o processo de retificação é transportada na forma de calor para a peça, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio. Para rebolos superabrasivos de CBN, os valores observados foram em torno de 20%. A menor partição de energia, quando da utilização de rebolos de CBN permite uma diminuição das temperaturas na região de corte e uma menor tendência de indução de danos térmicos à peça.

2.6 INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM DO REBOLO NA FORMAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE

Segundo Bianchi (1992), Silva (1994) e Oliveira (1988), a dressagem do rebolo é também fator que influencia os resultados pretendidos, pois é impossível considerar o desempenho de um rebolo sem conhecer em detalhes a sua condição de dressagem.



Os objetivos da dressagem são:

a) obtenção de concentricidade da face de trabalho com o eixo de rotação;

b) perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma;

c) retirada dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do rebolo.

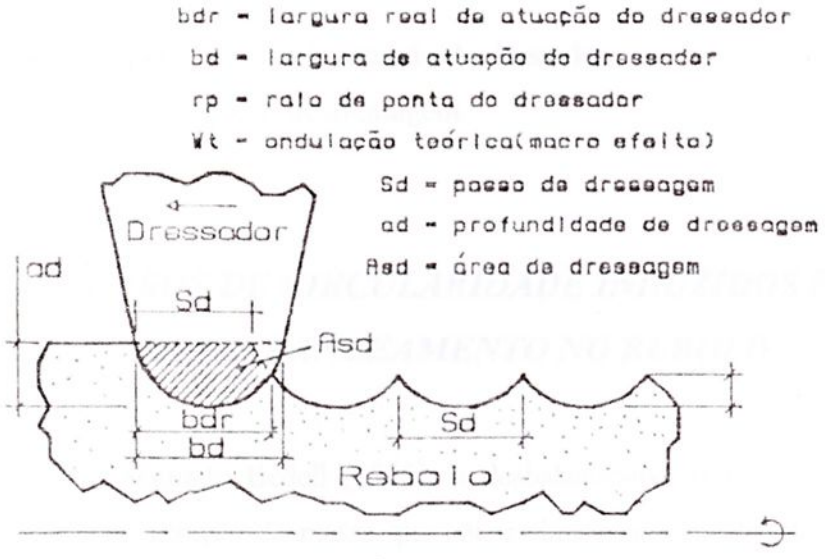


Figura 2.8 – Região de contato dressador / rebolo (Oliveira, 1988)

Ainda segundo Silva (1994) e Oliveira (1988), acrescenta-se um outro objetivo aos citados acima:

- remover as partículas da peça presas à face de trabalho que o jato de fluido não conseguiu remover.

Na operação de retificação, a geometria do dressador é aliada à profundidade. O passo de dressagem e, conseqüentemente, o grau de recobrimento, causam grande influência nas condições especificadas para a peça. Denomina-se grau de recobrimento à relação entre largura atuante do dressador e o passo de dressagem.

O grau de recobrimento é determinado segundo a eq. (2.1):

$$U_d = b_d / S_d \qquad (2.1)$$

Onde:

b_d é a largura de atuação do dressador

S_d é o passo de dressagem

2.7 ERROS DE CIRCULARIDADE INDUZIDOS POR DESBALANCEAMENTO NO REBOLO

Segundo Bedell (1996), o desbalanceamento é causado por uma massa ou concentração de massa que não é simetricamente distribuída sobre o eixo de rotação. Este desbalanceamento resulta em uma força oposta ao eixo de rotação. Quando o eixo está em rotação, a massa causa uma oscilação é causada por aceleração centrífuga não uniforme em um eixo em movimento. A equação para magnitude de força do rebolo em desbalanceamento é, a equação (2.2) exemplifica matematicamente este fenômeno:

$$F = m v^2 \qquad (2.2)$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Onde:

m = massa de desequilíbrio,

v = velocidade periférica do rebolo.

Esse desbalanceamento de massa do rebolo irá atritar a peça alternadamente e pode ser pensado como um vetor unidirecional de desequilíbrio de magnitude constante, que gira com o fuso. Esse desequilíbrio de massa produzirá uma peça de perfil geométrico não uniforme.

Além do balanceamento do rebolo e dos elementos rotativos, a análise por vibrações poderá facilitar a detecção precisa das interferências vibratórias. A figura 2.9 mostra um exemplo de *Erro de Circularidade* provocado pelo desbalanceamento do rebolo.

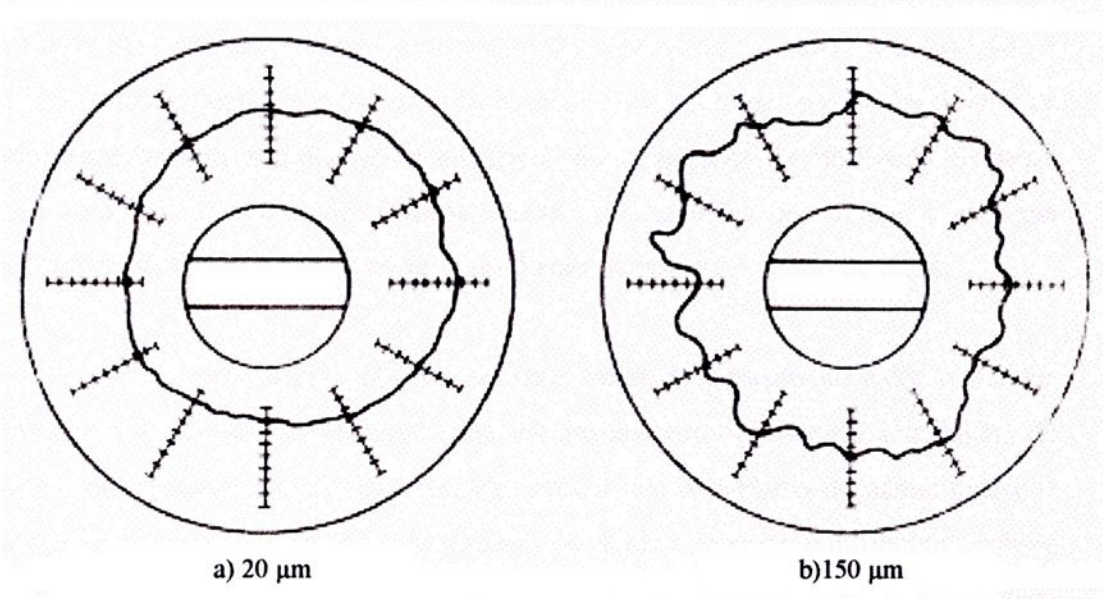


FIGURA 2.9 (a) Exemplifica uma peça retificada com rebolo balanceado (b) Exemplifica uma peça retificada com rebolo desbalanceado (Silva, 1994).

2.8 A IMPORTÂNCIA DO FLUIDO DE CORTE NA PREVENÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE

Conforme Minke (1999), os elevados atritos gerados durante o processo de retificação pode-se considerar um fator de extrema importância para contribuir com a formação dos *Erros de Circularidade* e com o estado final da peça retificada; assim, a utilização de fluidos com maior capacidade de redução de atrito e conseqüentemente redução do calor gerado nessa operação é fundamental para a inibição da ZTA, minimizar o favorecimento dessa zona é de vital importância para a melhoria da qualidade da peça retificada em todos os aspectos observados e os *Erros de Circularidade* serão o fator observado, para se comprovar essa qualidade.

De acordo com Runge e Duarte (1990), os fluidos de corte são substâncias utilizadas nos processos de usinagem, e sua constituição é relativamente simples sendo sua substituição feita em longo prazo. Os fluidos de corte apresentam-se como parte integrante dos processos de fabricação de peças por meio de remoção de cavacos, dentro do contexto que reúne a máquina operatriz, as ferramentas de corte, a produção de peças e o fluido de corte.

Para Minke (1999), as altas taxas de geração de calor ocorridas durante o processo de retificação são eliminadas pela ação direta dos fluidos de corte, contribuindo de maneira decisiva para a não ocorrência de danos térmicos superficiais à peça. Além da refrigeração, os fluidos de corte contribuem também para a lubrificação da peça, agindo de maneira decisiva para a integridade superficial final da peça retificada, tornando evidente que os mesmos apresentam-se como um parâmetro técnico muito importante.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Ainda segundo Minke (1999), alguns pré-requisitos básicos são necessários aos fluidos de corte, sendo que a lubrificação é a responsável pela diminuição do atrito da ferramenta com a peça, proporcionando como conseqüência uma menor geração de calor e uma baixa força de corte. Um outro pré-requisito é o poder de refrigeração apresentado pelo fluido de corte, impedindo que a peça atinja temperaturas excessivamente elevadas, podendo causar-lhe algum dano térmico. Além disso, o fluido de corte facilita a remoção de cavacos gerados na zona de contato ferramenta/peça. Assim, o fluido de corte previne um possível contato entre os grãos abrasivos e os cavacos gerados.

Segundo Motta e Machado (1995), a utilização de fluidos de corte na usinagem pode, em alguns casos, reduzir custos, aumentar a produção e gerar lucros, desde que seja realizada a escolha adequada do tipo de fluido de corte a ser usado. O mesmo deve atender às condições específicas de usinagem, permitindo assim seu máximo desempenho.

Blenkowski (1993), afirma que os fluidos de corte apresentam-se divididos em quatro grupos básicos: óleo integral, óleos solúveis e formadores de emulsões, fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos. Cada classe é definida em função da quantidade de óleo presente. O óleo pode ser mineral ou sintético. Óleos minerais são constituídos de hidrocarbonetos de bases parafínicas ou naftênicas, refinadas a partir de óleo mineral cru. A sua maior função é servir de base para as misturas e aditivação, devendo ser severamente hidrogenados a fim de destruir a maioria dos aromáticos policíclicos, os quais são cancerígenos. Por outro lado, os sintéticos são constituídos em sua maioria de poliglicóis ou ésteres.

Segundo Bennett [sd], fluidos à base de óleo contém menor capacidade de dissipação de calor, ou seja, os produtos à base de óleo não são capazes de refrigerar a peça efetivamente, causando elevada geração de calor no processo e criando condições desfavoráveis ao estado final da peça. A utilização

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

satisfatória, pois os rebolos de CBN possuem a característica de resistirem a elevadas temperaturas, além de dissiparem o calor com maior facilidade. Na tabela 2.1, são apresentados os principais tipos de fluido, em função de sua composição.

	Óleo	**Água - Óleo Solúvel (Emulsão)**	**Semi – Sintético**	**Sintético (Solução)**
Refrigeração	Fraca	De Muito Boa a Boa	Muito Boa	Excelente
Lubrificação	Excelente	De Muito Boa a Boa	Boa	Fraca

Tabela 2.1 - Propriedades de lubrificação e refrigeração dos mais comuns tipos de fluido de corte em retificação. Bennett, [sd].

Ainda segundo Bennett, [sd], experiências com a utilização de rebolos de CBN mostraram que os fluidos de corte a base de óleo são mais indicados para altas taxas de remoção de materiais, porém para médias e baixas taxas de remoção de material obteve-se a indicação de óleos sintéticos ou óleos solúveis. Dessa forma, fica claro a necessidade do desenvolvimento tecnológico de novas tendências quanto à criação de novas formulações e métodos de aplicação a respeito de tais fluidos.

Para Runge e Duarte (1989), o fluido de corte pode ser visto de diferentes maneiras com relação à sua aplicação e seu papel dentro do contexto industrial. Assim, para o fabricante de máquina operatriz o fluido de corte é visto apenas como um acessório, a ferramenta, a máquina, o operário, as peças e outros itens devem ser levados em consideração como um conjunto para a operação de retificação, com um único objetivo que é a produção de peças mecânicas mais rápida e econômica.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Ainda segundo Runge e Duarte (1989), Os fluidos de corte podem se vistos como parte integrante do processo de fabricação de componentes industriais, por meio da remoção de cavacos, num sistema que envolve a máquina retificadora, o fluido de corte, as peças em produção e a ferramenta. Com a grande competitividade existente no mercado, o sucesso de determinado produto é atingido através de uma excelente correlação entre os fatores citados. Assim, a escolha adequada de fluidos de corte com relação a diversos fabricantes e tipos de fluidos existentes no mercado exige extrema atenção. O fluido de corte influi diretamente sobre alguns fatores como:

1. A qualidade superficial das peças;
2. Produtividade;
3. Custo operacional;
4. Meio ambiente.

2.9 A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE APLICAÇÃO DE FLUIDOS NA PREVENÇÃO DO ERRO DE CIRCULARIDADE

Segundo Webster (1995, 1999), o desempenho dos fluidos de corte será melhorado com o aperfeiçoamento e direcionamento do seu sistema de aplicação. Isto significa que a bomba, o formato do bico e as tubulações devem ser encarados como um sistema vital de auxílio à tarefa na operação de retificação e assim obter peças com *Erros de Circularidade* menores, atentando-se para os seguintes aspectos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Formato do bico: o bico deve ser projetado para garantir-se a coerência do jato de fluido de corte. Webster (1995) desenvolveu um novo bico, de formato arredondado, baseando-se no bico desenvolvido por Rouse et al. (1952), para mangueiras de combate a incêndios. A representação desse bocal é apresentada na Figura 2.10.

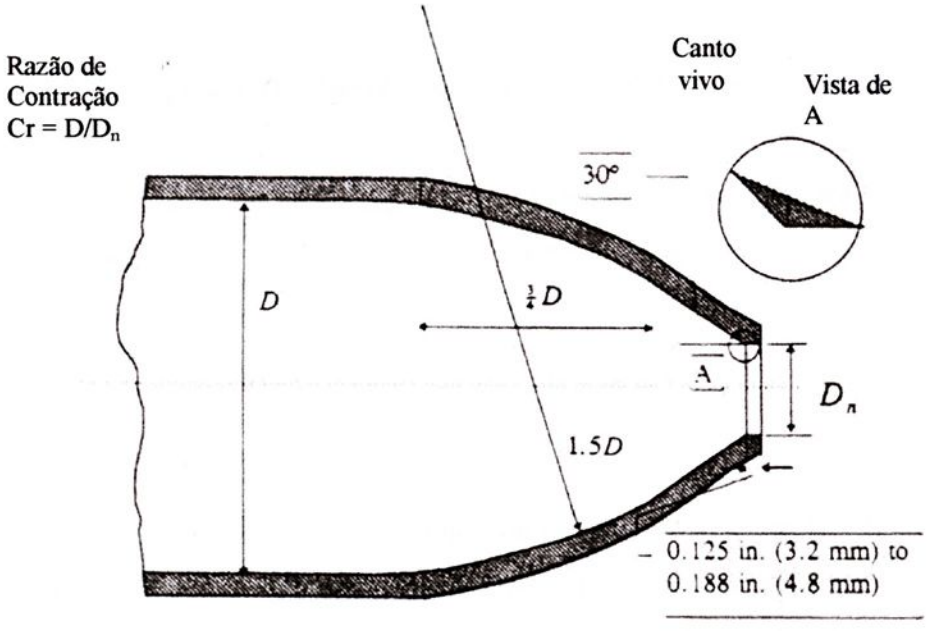


Figura 2.10 – Bocal de formato arredondado baseado em Rouse et al. (1952), *apud* Webster (1995).

Na figura (2.10): C_r é a razão de contração; D é o diâmetro da mangueira de alimentação de fluido de corte; D_n é o diâmetro de saída do bocal de fluido de corte.

Os bocais convencionais para introdução de fluido de corte têm uma ou duas paredes internas convexas, conforme apresentado na Figura 2.11, as quais permitem a separação do fluxo de fluido (Webster, 1995).

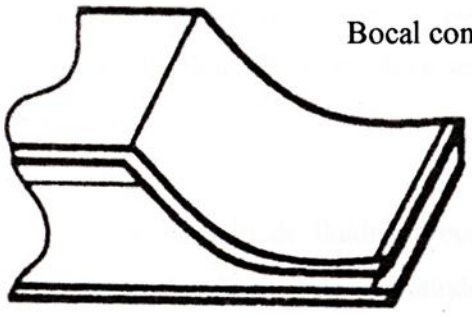


Figura 2.11 – Bocal convencional (Webster, 1995)

O fluxo de fluido separado é turbulento e apresenta uma queda de pressão na saída, a qual afetará, significativamente, a coerência do jato. De forma contrária, o bico de formato arredondado tem paredes internas côncavas, as quais garantem uma maior coerência do jato.

O projeto do bico de fluido de corte deve considerar: a geometria de entrada e de saída do bico; um acabamento superficial adequado, reduzindo-se as perdas por atrito; a eliminação de cantos vivos e uma razão de contração elevada (Webster 1995). Devem ainda ser considerados: o posicionamento do bico; a vazão mínima requerida a fim de se evitar a queima superficial da peça; a capacidade nominal da bomba de fluido de corte; a utilização de tubulações de diâmetro adequados e flexíveis, reduzindo-se a perda de carga e as quedas de pressão, resultado de curvas acentuadas na linha de alimentação.

Segundo Webster (1995, 1999), a angulação do bico de fluido de corte tem pouca influência no desempenho refrigerante do fluido, desde que seu fluxo seja direcionado adequadamente, na região de corte. Todavia, o aumento da

distância entre o bico e a região de corte reduz a eficiência de aplicação, principalmente quando da utilização de bicos com baixa coerência do jato. Conseqüentemente, o bico de fluido de corte deve ser posicionado o mais próximo possível da peça a ser retificada.

A velocidade do jato de fluido de corte (v_j): esta velocidade deve ser igual à velocidade periférica do rebolo, permitindo-se suplantar a barreira de ar criada pela rotação do mesmo. A relação unitária entre a velocidade do jato e a velocidade de corte (v_s) deve ser utilizada na maioria das aplicações, exceto onde a potência requerida e o custo da bomba de fluido de corte forem excessivos.

Webster (1995), investigou, ainda, a relação entre a velocidade de saída do jato e a velocidade de corte através de testes laboratoriais, onde o fluxo de calor foi medido com as três velocidades de corte, sendo que as velocidades de saída do jato utilizadas variaram entre valores inferiores e superiores à velocidade de corte.

T. 1059

Pode-se notar que um maior fluxo de calor indica uma refrigeração mais efetiva da configuração (v_j/v_s). Os resultados indicam que o fluxo de calor mantém-se constante a partir do valor v_j/v_s igual a um. Medições da pressão hidrodinâmica podem ser utilizadas para otimizar a aplicação de fluido de corte, em termos de direcionamento do bico, velocidade e vazão. Adicionalmente, as ocorrências de pressões positivas na região de corte indicam que o efeito de evaporação do filme de fluido de corte está ocorrendo e que, conseqüentemente, a taxa de remoção de material deve ser diminuída (Webster 1995).

Segundo Kovacecic e Hohan, (1995), a melhoria do efeito refrigerante/lubrificante na zona de retificação, resultado da aplicação de fluido de corte à alta velocidade, é responsável pela otimização do processo de retificação, através da redução do empastamento do rebolo e de uma limpeza mais efetiva do

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

mesmo. Além disso, as altas velocidades de aplicação permitem uma reafiação do rebolo, através da remoção de grãos já desgastados e mal ancorados de sua superfície. As elevadas vazões utilizadas melhoram a remoção de calor por convecção, impedindo a completa evaporação do filme de fluido de corte da zona de retificação. O desempenho do fluido é melhorado com o aumento de sua velocidade de aplicação. Como resultado tem-se a redução das forças de corte, desgaste do rebolo e incidência de queima, permitindo-se uma melhoria geral do processo de retificação.

O efeito da melhoria do sistema de filtração de fluido de corte é um fator importante a ser aplicado. A filtração torna-se crítica quando da utilização de rebolos de CBN. Um fluido com uma quantidade excessiva de cavacos leva a um empastamento prematuro do rebolo. Conseqüentemente, o número de perfilamentos irá aumentar, resultando no aumento dos custos de retificação. A filtração ineficiente acarretará problemas nas bombas de fluido de corte, ocasionando o desgaste de seus componentes internos, devido à abrasão entre os mesmos e as partículas metálicas contidas no fluido de corte.

2.10 PRINCIPAIS CARACTERISTICAS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DOS FLUIDOS DE CORTE UTILIZADOS EM RETIFICAÇÃO

Guo e Malkin (1995), afirmaram que o fluido de corte é usualmente aplicado na cunha formada entre o rebolo e a peça, conforme apresentado na Figura 2.11, para a retificação discordante.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

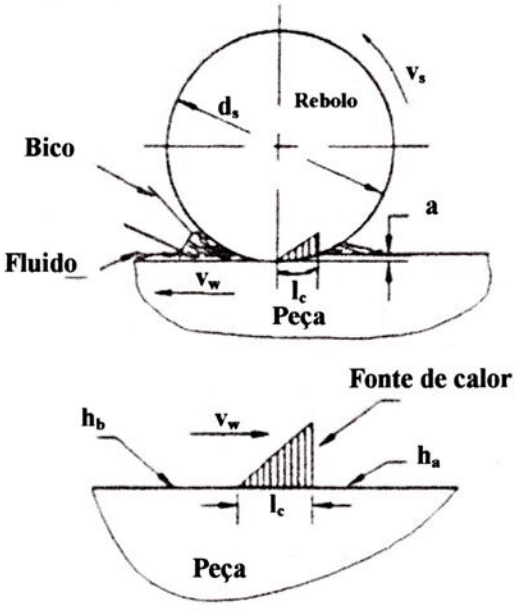


Figura 2.12 – Ilustração da retificação plana e do modelamento térmico (Guo e Malkin, 1995, com modificações).

v_s é a velocidade de corte; v_w é a velocidade da peça; a é a penetração do rebolo; l_c é o comprimento de contato; d_s é o diâmetro do rebolo; h_a é o coeficiente de película na região de aplicação do fluido de corte e h_b é o coeficiente de película na região oposta à de aplicação do fluido de corte.

Da quantidade total de fluido de corte que penetra na cunha, parte aloja-se nas porosidades do rebolo, sendo então carregada através da zona de retificação, enquanto o restante salpica para os lados ou para trás, sobre a peça. O percentual do fluido de corte que atravessa efetivamente a zona de retificação depende da estrutura do rebolo e das condições de aplicação (Engineer et al., 1992; Guo e Malkin, 1992; Krishnan et al., 1995). Rebolos utilizados em operações de *creep-feed* são mais eficientes na condução de fluido de corte através da zona de retificação que os rebolos utilizados em operações de retificação convencionais, permitindo assim uma refrigeração mais efetiva na

zona de retificação. Parte do fluido de corte aplicado pode também entrar em contato com a peça à frente da zona de retificação, promovendo a refrigeração desta região.

Segundo Lavine e Malkin (1990), uma aproximação utilizada na determinação do efeito refrigerante dos fluidos de corte nas temperaturas de retificação era de se assumir como constante o coeficiente de transmissão de calor por convecção sobre toda a peça retificada. Todavia, esta aproximação parece não ser a mais adequada para a representação deste fenômeno. Um maior coeficiente de transmissão de calor é esperado atrás da zona de retificação, onde o fluido de corte é aplicado para a retificação concordante, do que na frente da zona de retificação. Dentro da zona de retificação, a refrigeração por convecção pode ser, usualmente, negligenciada para a retificação convencional, devido à ocorrência do efeito de evaporação do filme de fluido de corte, mas não para o *creep-feed*, onde a refrigeração é crítica.

Segundo Yasui e Tsukuda (1983), Kohli et al (1995) e Malkin (1974), mostraram que, o efeito da evaporação do filme de fluido de corte afeta os óleos de corte e os fluidos solúveis de diferentes maneiras. Conforme apresentado pelos autores, a ocorrência deste fenômeno nos fluidos solúveis reduz o valor de seu coeficiente de transmissão de calor por condução a valores próximos ao do ar. Como resultado, tem-se que o desempenho refrigerante destes fluidos é deteriorado, obtendo-se o mesmo desempenho de uma retificação a seco. Na medida que esses fluidos, apresentam praticamente as mesmas características da água, a evaporação do filme de fluido lubrificante ocorre a temperaturas um pouco acima de 100 °C. Por outro lado, os óleos de corte são uma mistura de diferentes óleos (*blending*), contendo diferentes pontos de ebulição, sendo que o seu valor médio é em torno de 300 °C. Conseqüentemente, para operações de retificação mais severas, o efeito da evaporação do filme de fluido de corte é mais crítico, quando da utilização de fluidos de corte solúveis. Na região de corte, estas



temperaturas são facilmente ultrapassadas, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio, sendo desprezível o efeito refrigerante na região de corte, em função da ocorrência deste fato. Tais resultados foram comprovados, para rebolos de óxido de alumínio, utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, para a determinação das temperaturas na região de corte, na subsuperfície da peça e para operações de retificação com e sem fluido de corte.

Guo e Malkin (1995) investigaram o efeito do fluido de corte em distintas posições da peça a ser retificada, para uma operação de retificação plana, sendo estudado seu efeito na região de corte, à frente e atrás da zona de retificação. Foi possível determinar, segundo os pesquisadores, que o efeito refrigerante, exercido pelo fluido dentro da região de corte é crítico para operações de *creep-feed*, porém ineficaz para operações tradicionais de retificação, devido ao efeito da evaporação do filme de fluido de corte, devido às temperaturas geradas. A refrigeração à frente e atrás da zona de retificação tem pequena influência no máximo aumento de temperatura na região de corte, mas a refrigeração na face final pode reduzir sensivelmente a máxima temperatura de retificação na zona de retificação, especialmente durante o desengajamento rebolo-peça durante o final do corte, para operações de *creep-feed* (Guo e Malkin, 1994; Guo e Malkin, 1995). Todavia o efeito refrigerante fora da zona de refrigeração deve ser considerado nas formulações de transmissão de calor e nas predições das temperaturas em diferentes pontos do componente retificado.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

2.11 A INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DE FLUIDOS PARA A COMPETITIVIDADE DA OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO

Segundo Novaski e Dörr (1999), a usinagem com uso da otimização de fluidos ou da utilização da mínima quantidade de refrigeração (MQR) vem sendo, freqüentemente usada, por vários ramos da indústria. Os gastos com refrigeração representam, em média, 20% dos custos de manufatura, sendo um gasto bem acentuado, se comparado aos gastos destinados à ferramenta; em média de 2% a 4%, além dos gastos adicionais de manutenção do sistema e separação do cavaco do fluido de corte para uma posterior refundição. Um outro aspecto que deve ser levado em consideração é o da ausência do fluido de corte, que possui sua função positiva nos processos, pois é responsável pela refrigeração e lubrificação do sistema, e ainda auxilia na expulsão do cavaco da região de corte. Outro fator de extrema importância é o da redução do calor transferido para a ferramenta, peça e máquina, principalmente, em processos como furação, que na ausência do fluido de corte ocasiona um desgaste excessivo da ferramenta e, conseqüentemente, redução de sua vida útil.

Com a utilização da otimização ou da MQR, os gastos relacionados ao armazenamento excessivo de fluidos de corte são reduzidos e os custos relacionados à separação do óleo residual do cavaco caem a zero, uma vez que o peso em óleo impregnado no cavaco permanece abaixo de 0,3% do peso deste, não gerando problemas quanto à fundição do mesmo. Nesse processo, uma outra vantagem da aplicação da MQR é a permanência de uma fina película de óleo sobre a superfície da peça, impedindo, assim, a ocorrência de corrosão; e ainda reduz os gastos com a limpeza do material.

No próximo capítulo serão apresentados os materiais e os métodos envolvidos neste estudo.



CAPÍTULO 3

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Este estudo foi realizado no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), na UNESP - Campus de Bauru e utilizaram-se os seguintes equipamentos:

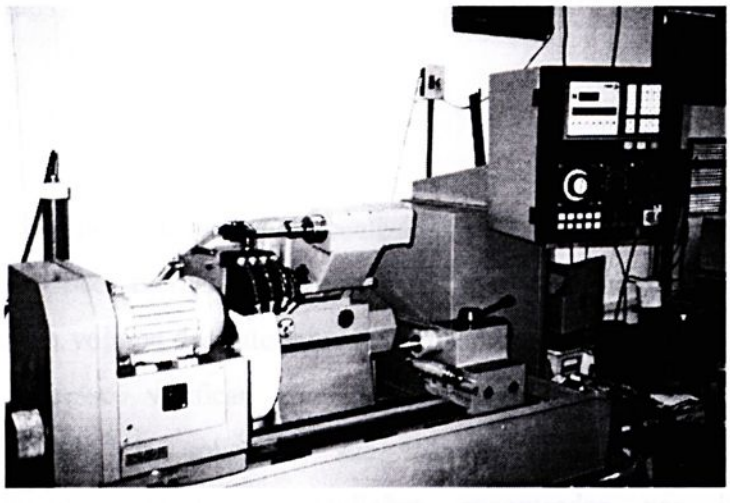


Figura 3.1- Máquina retificadora cilíndrica CNC, modelo RUAP 515 H-CNC, marca SULMECÂNICA.

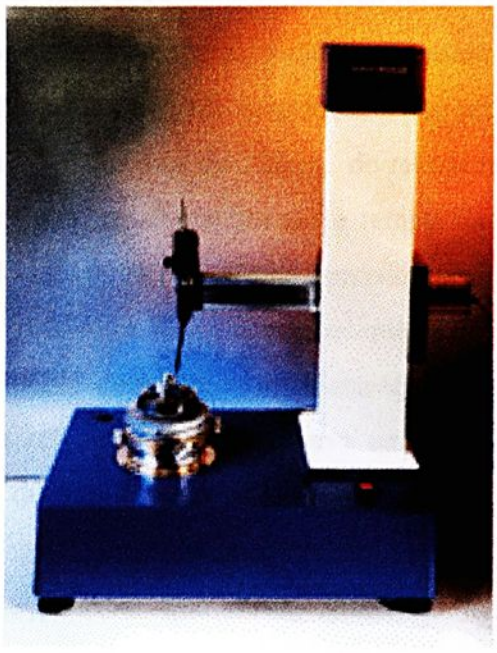


Figura 3.2 Foto da máquina TAYROND 31C (MANUAL DIDÁTICO Taylor-Hobson 2002).

Materiais utilizados.

- Aço VC 131 com 60 HRc.

A condição de usinagem realizada nesse trabalho foi baseada em levantamento estatístico, efetuado no parque industrial da região de São Paulo. Tendo-se em vista o volume de material removido por ensaio (10mm no diâmetro do material), pôde-se verificar que tal condição exigiu do conjunto ferramenta/fluido/modo de aplicação, sua máxima eficiência, tornando os resultados compatíveis com as condições encontradas nas indústrias, consideradas abaixo do limite proposto para cada ensaio, o qual foi realizado continuamente sem intervalos de parada.

Utilizou-se uma velocidade tangencial do rebolo de a 33m/s, igual à velocidade do jato de fluido de corte fornecido pelo bocal otimizado, proposto por Webster (1995). Os ensaios foram constituídos por ciclos de usinagem, os quais foram responsáveis pelo avanço de 100μm do rebolo no diâmetro do corpo de prova, com 3mm de largura de retificação e tempo de *spark out* igual a 8 segundos. Considerando os 10mm de material removido no diâmetro do corpo de prova, obteve-se então 100 ciclos de usinagem, os quais representaram um ensaio completo para cada conjunto de parâmetros de entrada proposto. A operação de dressagem realizada no rebolo convencional teve um grau de recobrimento Ud igual 5. A operação de perfilamento realizada no rebolo superabrasivo foi efetuada por meio de aglomerado de diamante do tipo *fleeze* e constante para todos os ensaios. Cabe ressaltar que foram realizados três repetibilidades de ensaios para cada condição proposta.

3.2 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO REBOLO UTILIZADO NESSE ESTUDO

Os rebolos utilizados possuem especificação conforme proposto no projeto de pesquisa. Assim o rebolo convencional de Óxido de Alumínio possui especificação 38A46KVS, diâmetro externo de 350 mm e espessura de 20 mm. O rebolo de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) com a seguinte especificação B151K150V17M3, fabricado com ligante vitrificado, com dimensões, e características similares ao rebolo convencional, definidos em conjunto com a empresa MASTER DIAMOND FERRAMENTAS LTDA e totalmente compatível com o rebolo convencional de óxido de alumínio.

O rebolo convencional será dressado com grau de recobrimento (Ud) igual a 5, e o rebolo superabrasivo será perfilado com perfilador tipo *fleeze*, ou seja, aglomerado de diamante, com penetração de 5μm, até um valor

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

correspondente à eliminação total da camada desgastada do rebolo, que será determinado por meio de ensaios preliminares.

3.3 DADOS TÉCNICOS DOS FLUIDOS DE CORTE UTILIZADO NESTE ESTUDO

Os fluidos de corte utilizados nos ensaios foram emulsão e o óleo integral e, sendo que o fabricante, sugeriu uma concentração, no caso da emulsão, de 5% com pH em torno de 9,0. O óleo integral fornecido foi utilizado da forma como foi enviado pelo fabricante, sendo o mesmo de grande aplicabilidade industrial. A emulsão, identificada pelo código HOCUT 4110, segundo a HOUGHTON, empresa que fabrica o produto, apresenta componentes como:

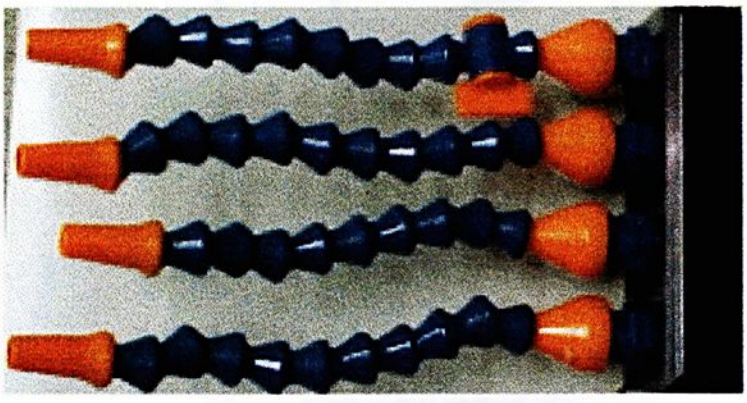
1. água;
2. bactericida;
3. amidas graxas;
4. antiespumante;
5. anticorrosivo.

As características do produto são: densidade de 1,025 kg/dm^3 à 20°C e uma densidade de 1,050 kg/dm^3 à 4°C, possuindo estado líquido e pH igual a 9,0 com uma concentração de 3%. Após o preparo da emulsão, efetuaram-se medições de pH, cujo valor encontrado foi de 9,0 e medição de concentração com refratômetro portátil, citado anteriormente, cujo valor coincidiu com o indicado pelo fabricante (5%).

O Óleo Integral, utilizado da forma como fornecido pelo fabricante, possui código, de acordo com a HOUGHTON, CUT MAX CF10, e densidade de 0,835 na temperatura de 20°C e 0,855 para uma temperatura de 4°C.

A viscosidade apresentou-se entre 3,5cSt e 4,9cSt à 40°C, possuindo um ponto de fulgor mínimo de 120°C e ponto de combustão de 130°C. O fluido, isento de água, sedimentos não apresentou corrosão em lâmina de cobre.

3.4 APRESENTAÇÃO DO BOCAL CONVENCIONAL



A figura 3.3, representa o bocal convencional de introdução de fluidos, que se encontra originalmente nas máquinas retificadoras.

3.5 CONSTRUÇÃO DOS BOCAIS OTIMIZADOS PARA APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE

Três bocais de aplicação de fluido de corte foram desenvolvidos, em latão, para posterior teste, com diferentes diâmetros de saída D_n (Webster, 1995), conforme apresentado nas Figuras 3.4 a 3.6..

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

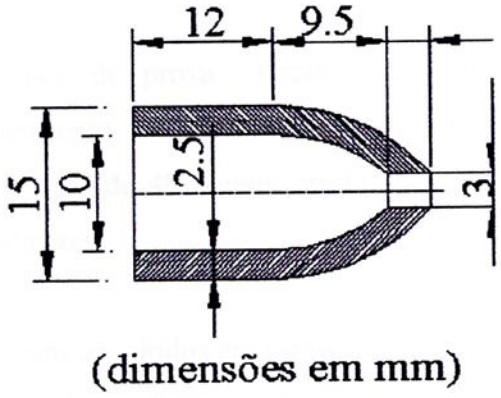


Figura 3.4 - Bocal de 3 mm de diâmetro de saída – dimensões básicas

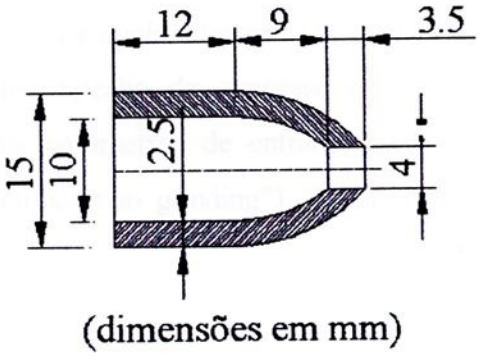


Figura 3.5 - Bocal de 4 mm de diâmetro de saída – dimensões básicas

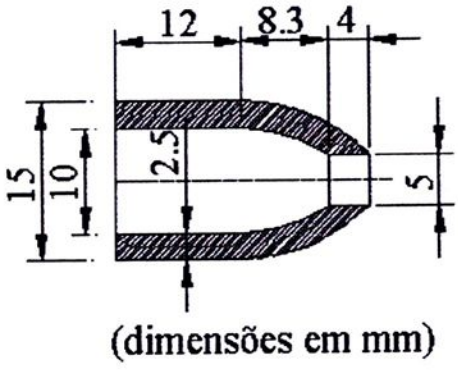


Figura 3.6 - Bocal de 5 mm de diâmetro de saída – dimensões básicas

3.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram dimensionados, com 58 mm de diâmetro, após torneamento de uniformização da mesma e 15mm de largura, correspondendo a um total de 48. Foram produzidos 10 corpos de prova a mais para os ensaios preliminares.

Eles foram adquiridos em forma de barra, foram cortados com 1mm a mais na largura (16mm) para futura operação de uniformização da face da peça. Dessa forma o corpo de prova ficou completamente uniformizado em todas as faces permitindo um maior desempenho dos ensaios. Após tais operações, enviou-se os corpos de prova para tratamento térmico de tempera na empresa Brasimet (Campinas), os quais ficaram com aproximadamente 60HRc de dureza, para garantir o desempenho do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, com tais parâmetros de entrada, na retificação de aços de elevada dureza (DTG – "Difficult to grinding"), de difícil usinagem. A figura 3.7 ilustra este parágrafo.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

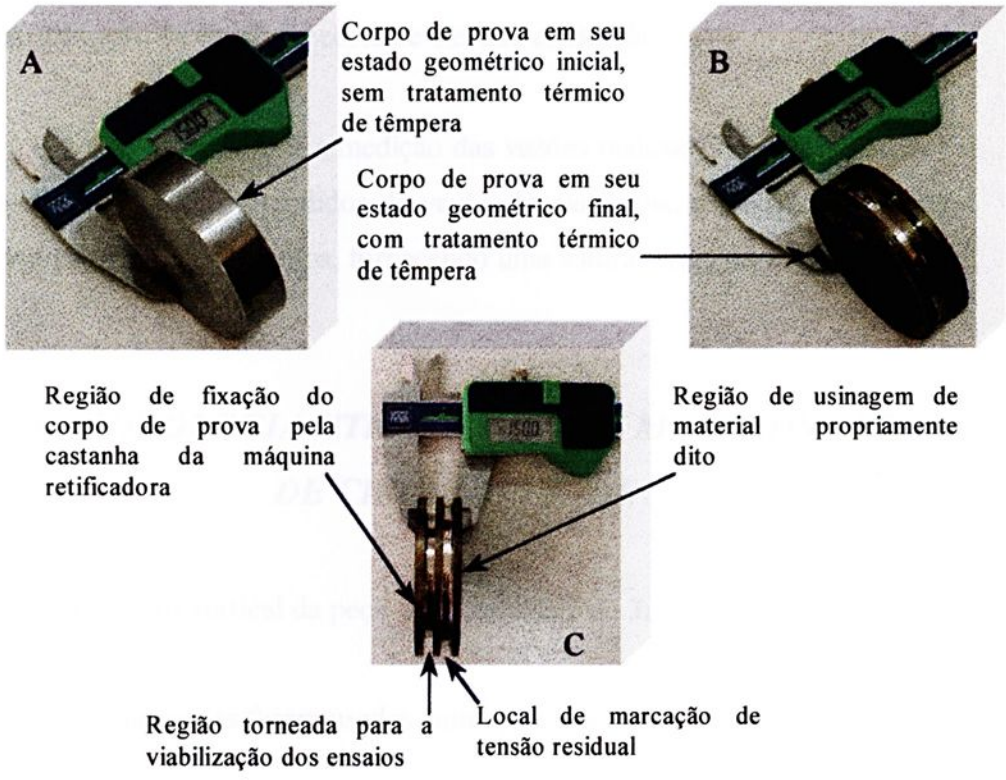


Figura 3.7 - (A) - Corpo de prova no estado geométrico inicial

(B) - Corpo de prova no estado geométrico final com tratamento térmico

(C) – Detalhamentos do local onde iram ser realizados as medições

3.7 METODOLOGIA UTILIZADA PARA MEDIR AS VAZÕES DOS BOCAIS

Conforme projeto proposto, os bocais para a aplicação otimizada de fluido de corte foram construídos de acordo com o modelo sugerido por Webster (1995), como mostrado anteriormente. Para a confecção dos mesmos foram adquiridas barras de latão, material de fácil torneamento, de forma a se viabilizar a geometria característica do mesmo. Os bocais foram elaborados com diâmetro

final de 5mm, 4mm e 3mm, possibilitando valores diferenciados de vazão através de uma aplicação de fluido de corte de elevada eficiência.

Para se efetuar a medição das vazões realizadas com tais bocais, foi feita a aquisição de um medidor de vazão. Dessa forma, o medidor de vazão é conectado logo na saída bomba, fornecendo uma leitura direta da vazão em l/min.

3.8 METODOLOGIA UTILIZADA PARA MEDIR OS ERROS DE CIRCULARIDADE

- O deslocamento vertical da peça a ser medida é de 3mm;
- as peças construídas foram usadas conforme relato;
- Usou-se querosene, tetra cloreto de carbono e em seguida com éter, para a lavagem das mesmas;
- De cada peça obteve-se 5 medidas em (μm);
- ajustou-se a máquina de medir circularidade, conforme recomendado no manual de operação, que obedeceu à seguinte rotina:

a) Colocou-se o apalpador da máquina no final da distância de 3mm, conforme ilustrado na figura 3.8.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

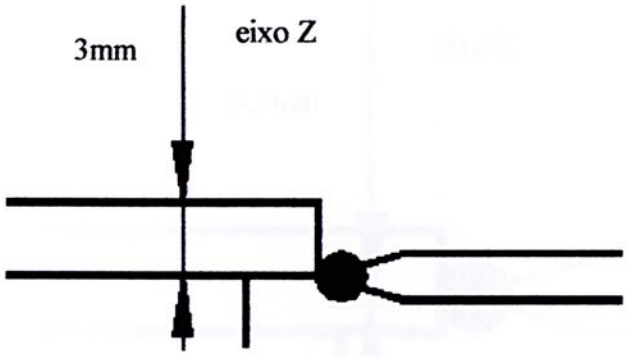


Figura 3.8 – Representa a colocação da haste (detalhe figura 3.2) de medição em contato com a peça.

b) Deslocou-se o eixo Z 0,75 mm acima e obteve-se a primeira medida, conforme figura 3.9.

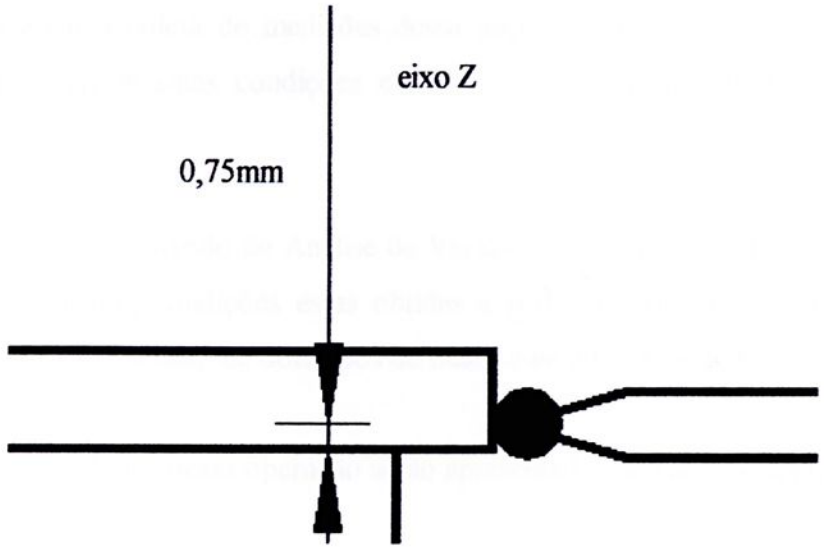


Figura 3.9 – Representa o deslocamento da haste para a primeira medição

c) Deslocou-se o eixo Z 0,3 mm para cima, obtendo-se a segunda medida, conforme ilustrado na figura 3.10.

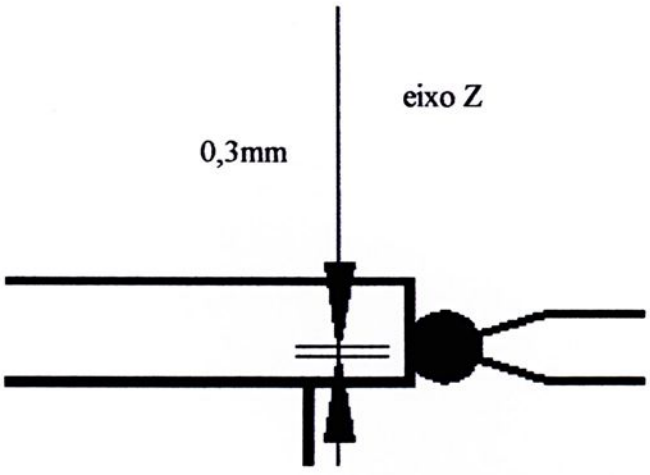


Figura 3.10 – Representa o deslocamento da haste para a segunda medição.

d) Deslocou-se o eixo Z mais 0,3 mm, obtendo-se a terceira medida; deslocou-se o eixo Z mais 0,3 mm, obtendo-se a quarta medida; deslocou-se o eixo Z mais 0,3 mm, obtendo-se a quinta medida.

e) Terminando a coleta de medições dessa peça, houve a coleta de dados da segunda, nas mesmas condições e assim, sucessivamente em todas as 45 peças.

f) Foi utilizado o Método de Análise de Variância, para avaliar estes resultados estatisticamente, condições estas obtidas a partir da combinação de quatro diâmetros de bocais, de dois tipos de fluido e de dois tipos de rebolo.

g) Os dados colhidos nessa operação serão apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para o *Erro de circularidade* usando os bocais (convencionais, de 5mm, de 4mm e de 3mm), para os rebolos (Óxido de Alumínio e CBN) e os fluidos de corte (emulsão e óleo intergral).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	5OiOx1	14,05	15,05	14,75	16,00	14,75
2ª	5OiOx2	16,00	15,15	14,95	15,95	14,05
3ª	5OiOx3	15,00	14,05	14,40	15,05	15,95

TABELA 4.1 - CÓDIGO -5OiOx - Resultado das medições, usando BOCAL de 5mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	4OiOx1	11,25	9,15	10,75	10,95	9,55
2ª	4OiOx2	10,25	10,80	10,85	9,45	10,35
3ª	4OiOx3	9,25	10,75	10,45	10,25	9,95

TABELA 4.2 - CÓDIGO -4OiOx- Resultado das medições, usando BOCAL de 4mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	3OiOx1	4,85	4,05	4,15	4,80	4,85
2ª	3OiOx2	4,15	4,90	4,35	4,50	5,00
3ª	3OiOx3	5,00	4.95	5,00	4,55	5,05

TABELA 4.3 - CÓDIGO -3OiOx - Resultado das medições, usando BOCAL de 3mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO oxido de alumínio (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	COiOx1	18,05	18,15	19.45	19.95	18.40
2ª	COiOx2	19,45	20,15	19,55	19,95	18,05
3ª	COiOx3	18,05	18,95	18.90	19,45	18.65

TABELA 4.4 - CÓDIGO –CoiOx - Resultado das medições, usando BOCAL convencional, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO oxido de alumínio (todas as medidas em μm).



	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	CoiC1	16,45	17,85	17,55	18,95	18,45
2ª	CoiC2	17,85	17,45	18,75	18,55	18,95
3ª	COiC3	18,45	18,95	18,55	18,25	18,75

TABELA 4.5 - CÓDIGO – CoiC - Resultado das medições, usando BOCAL convencional, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	5OiC1	8,05	8,25	8,45	8,65	8,55
2ª	5OiC2	8,00	8.45	8,25	8,55	8,25
3ª	5OiC3	8,10	8,45	8,65	8,45	8,35

TABELA 4.6 - CÓDIGO -5OiC - Resultado das medições, usando BOCAL 5mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	4OiC1	5,65	5,25	5,35	5,85	5,55
2ª	4OiC2	5,50	4,65	5,95	5,85	4,65
3ª	4OiC3	5,75	5,65	5,80	4,85	4,05

TABELA 4.7 - CÓDIGO -4OiC - Resultado das medições, usando BOCAL 4mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em μm).



	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	3OiC1	2,70	2,65	1,00	1,45	1,50
2ª	3OiC2	2,45	1,90	1,35	2,50	1,75
3ª	3OiC3	1,45	1,40	1,80	1,50	2,05

TABELA 4.8 - CÓDIGO -3OiC - Resultado das medições, usando BOCAL 3mm, FLUIDO DE CORTE Óleo Integral, REBOLO CBN (todas as medidas em µm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	5EC1	13,25	13,65	14,45	15,00	14,35
2ª	5EC2	14,25	15,05	14,05	14,00	15,45
3ª	5EC3	13,70	13,95	15,05	14,65	14,95

TABELA 4.9 - CÓDIGO -5EC - Resultado das medições, usando BOCAL 5mm, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em µm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	4EC1	14,55	15,25	15,15	16,65	15,80
2ª	4EC2	15,75	15,55	16,25	16,45	16,75
3ª	4EC3	16,40	15,85	25,45	16,85	16,00

TABELA 4.10 - CÓDIGO -4EC - Resultado das medições, usando BOCAL 4mm, FLUIDO DE CORTE, Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em µm).



	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	3EC1	3,55	3,85	5,40	4,85	4,25
2ª	3EC2	4,45	3,85	3,75	5,85	4,75
3ª	3EC3	4,65	4,85	5,25	4,75	5,25

TABELA 4.11 - CÓDIGO -3EC - Resultado das medições, usando BOCAL 3mm, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	CEC1	16,25	16,85	17,45	17,85	16,85
2ª	CEC2	17,45	15,85	16,95	17,85	17,00
3ª	CEC3	17,25	16,75	16,85	17,95	16,85

TABELA 4.12 - CÓDIGO –CEC - Resultado das medições, usando BOCAL convencional, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO CBN (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	CEOx1	18,40	18,80	18,75	18,85	19,45
2ª	CEOx2	19,00	18,45	18,65	18,45	19,00
3ª	CEOx3	15,25	16,85	17,00	16,85	16,95

TABELA 4.13 - CÓDIGO –CEOx - Resultado das medições, usando BOCAL convencional, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	5EOx1	15,25	16,85	17,00	16,85	16,95
2ª	5EOx2	16,45	16,65	17,05	16,80	15,45
3ª	5EOx3	15,00	15,15	15,65	16,05	15,45

TABELA 4.14 - CÓDIGO -5EOx - Resultado das medições, usando BOCAL 5mm, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	4EOx1	15,00	15,15	15,65	16,05	15,45
2ª	4EOx2	15,85	15,15	15,65	16,05	15,45
3ª	4EOx3	14,20	16,15	15,40	15,25	16,45

TABELA 4.15 - CÓDIGO -4EOx - Resultado das medições, usando BOCAL 4mm, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

	CÓDIGO	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida
1ª	3EOx1	8,00	7,90	8,50	8,00	8,05
2ª	3EOx2	8,50	7,65	8,50	8,00	8,25
3ª	3EOx3	7,65	7,95	8,50	8,65	7,95

TABELA 4.16 - CÓDIGO -3EOx - Resultado das medições, usando BOCAL 3mm, FLUIDO DE CORTE Emulsão, REBOLO óxido de alumínio (todas as medidas em μm).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

4.1 RESULTADOS E ANÁLISES DAS VAZÕES DOS BOCAIS

Na Tabela 4.17 observa-se a diferença acentuada entre os valores de vazões obtidas, com as diversas combinações de bocais, fluidos e de rebolos. Pode-se verificar que o bocal de 3mm apresentou uma velocidade de jato de 34,7 m/s, velocidade esta suficiente para vencer a barreira aerodinâmica tendo consumido um volume de 17,9% de fluído de corte, se comparado ao volume de fluidos de corte consumido pelo o bocal convencional e este bocal obteve uma velocidade de jato de apenas 21,47 m/s. Velocidade insuficiente para vencer a barreira aerodinâmica criada pela a rotação do rebolo.

Bocal (mm)	Pressão (kgf/cm^2)	Vazão (l/min)	Vel do jato (m/s)	Vazão Max. obtida pela bomba (l/min)	Vel. máx do jato (m/s)
3	4,0	13,99	33	14,70	34.7
4	4,5	24,88	33	25,50	33,84
5	5,0	38,88	33	38,90	33,03
Conv	5,5	125,40	33	82,00	21,47

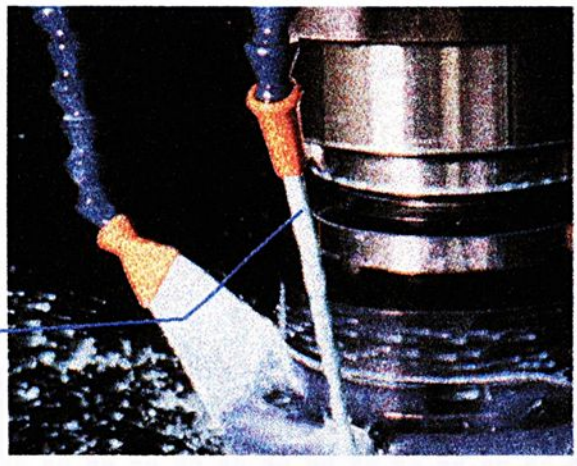
Tabela 4.17 - Valores das vazões obtidas pelo sistema de refrigeração da máquina retificadora cilíndrica CNC, modelo RUAP 515 H-CNC, marca SULMECÂNICA.



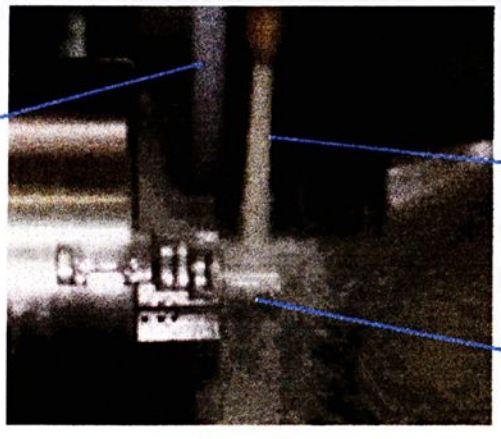
4.2 ANÁLISE VISUAL DA AÇÃO DOS BOCAIS CONVENCIONAIS E OTIMIZADO

Pode-se observar que na figura 4.1 (a), bocal convencional o jato de fluido é levemente arrastado pela barreira de ar produzida na operação, enquanto na figura 4.1(b), nota-se que o jato mantém-se constante e consegue vencer a barreira aerodinâmica e assim introduzir o fluido onde realmente está acontecendo à retificação, vencer essa barreira é fator primordial para atingir a região em que está acontecendo a operação de retificação.

Figura 4.1- Ação dos bocais (convencional e otimizado), no momento de introdução de fluidos em uma operação de retificação.



(a)– Introdução de fluido de corte através do bocal convencional (*Revista Máquinas e Metais*, julho 1994 capa).



(b) – Introdução de fluido de corte através do bocal otimizado

4.3 ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS USANDO 4 TIPOS DE BOCAIS, FLUIDO DE CORTE EMULSÃO E O REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.

Para essas 4 condições, visualizadas em 15 medições na figura 4.2, pode-se afirmar que, em média, o conjunto com o bocal 3mm tem desempenho siguinificativo ($p<0,05$) superior aos demais.A Figura 4.2 representa os resultados dos *Erros de Circularidade* considerando os bocais: convencional, de 5mm, 4mm, e 3mm, com fluido de corte emulsão e rebolo óxido de alumínio, são apresentados na forma de gráficos, nos quais cada ponto representa uma medida do *Erro de Circularidade* em μm.

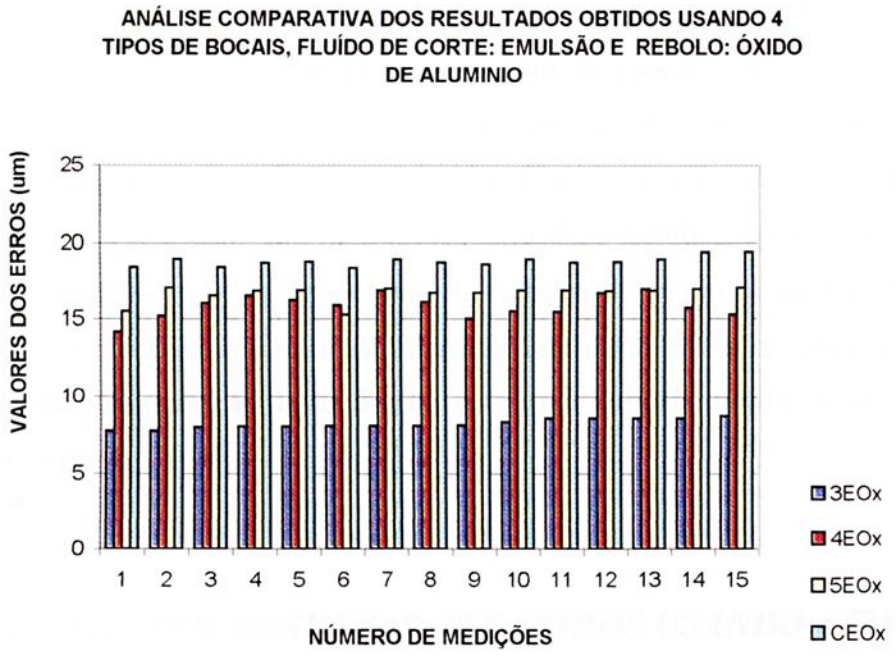


Figura 4.2 - Análise comparativa dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, fluido de corte: Emulsão e rebolo de Óxido de Alumínio.

Grupo	Média(µm)	DesvPad
3EOx	**8,14**	**0,32**
4EOx	15,80	0,76
5EOx	16,53	0,65
CEOx	18,78	0,32

TABELA 4.18 - Resultado estatístico dos bocais, fluido de corte emulsão e o rebolo de óxido de alumínio.

Para essas 4 condições, visualizadas em 15 medições na figura 4.2, pode-se afirmar que, em média, o conjunto com o bocal 3mm tem desempenho siguinificativo ($p<0,05$) superior aos demais. A tabela 4.18 mostra as médias e respectivos desvios-padrão dessas condições. Tal desempenho do bocal 3mm deve-se ao fato deste manter velocidade do jato bem próxima a velocidade tangencial do rebolo e com isso retirado do rebolo os cavacos colados em seus grãos, deixando-os com sua aresta cortante livre. A pressão exercida por esse bocal é suficiente para penetrar na barreira aerodinâmica formada pela alta rotação do rebolo, porém, com a combinação: Emulsão e o Rebolo de Óxido de alumínio ainda apresentam um *Erro de Circularidade* significativo, pois o fluido de corte -Emulsão- tem boa capacidade de refrigeração e pouca capacidade de lubrificação e o rebolo de Óxido de Alumínio tem baixo poder de dissipar esse calor, formado na operação de retificação, este calor flui pela peça e provocando assim um *Erro de Circularidade* significativo.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS USANDO 4 TIPOS DE BOCAIS, FLUIDO DE CORTE ÓLEO INTEGRAL E REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.

A figura 4.3 representa os resultados dos *Erros de Circularidade* onde foram usados os bocais: convencional, 5mm, 4mm, e 3mm, com fluido de corte óleo integral e rebolo óxido de alumínio, foram considerados 10 medidas

apresentados na forma de gráficos, no qual cada ponto representa a uma medida do *Erro de Circularidade*.

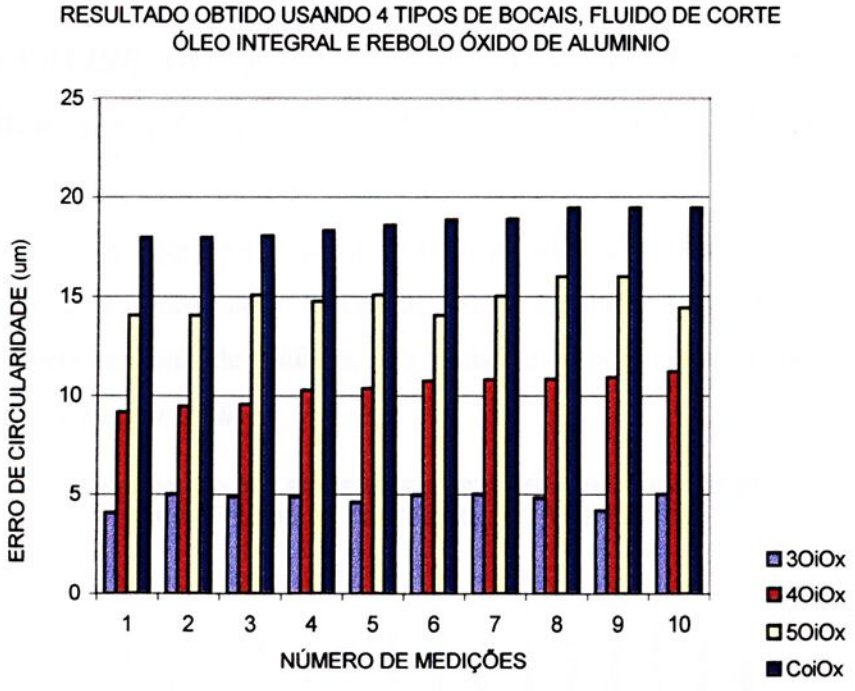


Figura 4.3 – Resultado obtido usando 4 tipos de bocais, fluido de corte Óleo Integral e rebolo de Óxido de Alumínio.

Grupo	*Média(µm)*	*DesvPad*
3OiOx	**4,68**	**0,35**
4OiOx	10,34	0,72
5OiOx	15,01	0,71
COiOx	19,13	0,73

TABELA 4.19 - Resultado estatístico dos bocais, fluido de corte óleo integral e o rebolo de óxido de alumínio.

A substituição de Emulsão pelo o Óleo Integral, possibilita menores valores dos *Erros de Circularidade*. O conjunto com bocal 3mm apresenta, em média *Erros de Circularidade siguinificativo* ($p<0,05$) inferior aos demais. Tal fato ocorre, pois Óleo Integral possuiu uma boa capacidade de

lubrificação e pouca capacidade de refrigeração. Neste caso, nota-se que a capacidade de lubrificação diminui o *Erro de Circularidade.*

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS USANDO 4 TIPOS DE BOCAIS, FLUIDO DE CORTE EMULSÃO E REBOLO CBN

A figura 4.4 representa os resultados dos bocais: convencional, de 5mm, 4mm, e 3mm, com fluido de corte emulsão e rebolo óxido CBN, apresentados na forma de gráficos, nos quais, cada ponto representa uma medida do *Erro de Circularidade*.

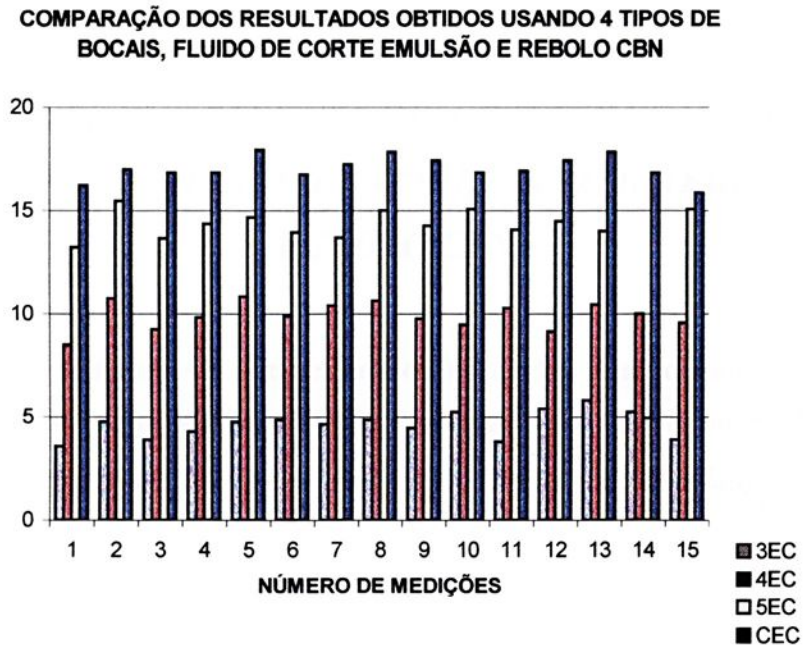


Figura 4.4 – Comparação dos resultados obtidos usando 4 tipos de bocais, fluido de corte Emulsão e rebolo CBN.

Grupo	Média(µm)	DesvPad
3EC	**4,62**	**0,67**
4EC	16,58	2,54
5EC	13,72	2,50
CEC	17,07	0,58

TABELA 4.20 - Resultado estatístico dos bocais, fluido de corte emulsão e o rebolo de CBN.

Como nas combinações anteriores, mais uma vez o bocal 3mm apresenta-se com melhor resultado, porém em relação ao conjunto 3OiOx, observa-se que apesar do fluido de corte ser emulsão, nota-se a capacidade do rebolo CBN em retirar calor, conforme também relatado no capitulo 2.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS USANDO 4 TIPOS DE BOCAIS, FLUIDO DE CORTE ÓLEO INTEGRAL E REBOLO CBN

A figura 4.5 representa os resultados dos conjuntos de bocais: convencional, de 5mm, 4mm, e 3mm, com fluido de corte óleo integral e rebolo CBN, onde ponto representa a uma medida do *Erro de Circularidade*.

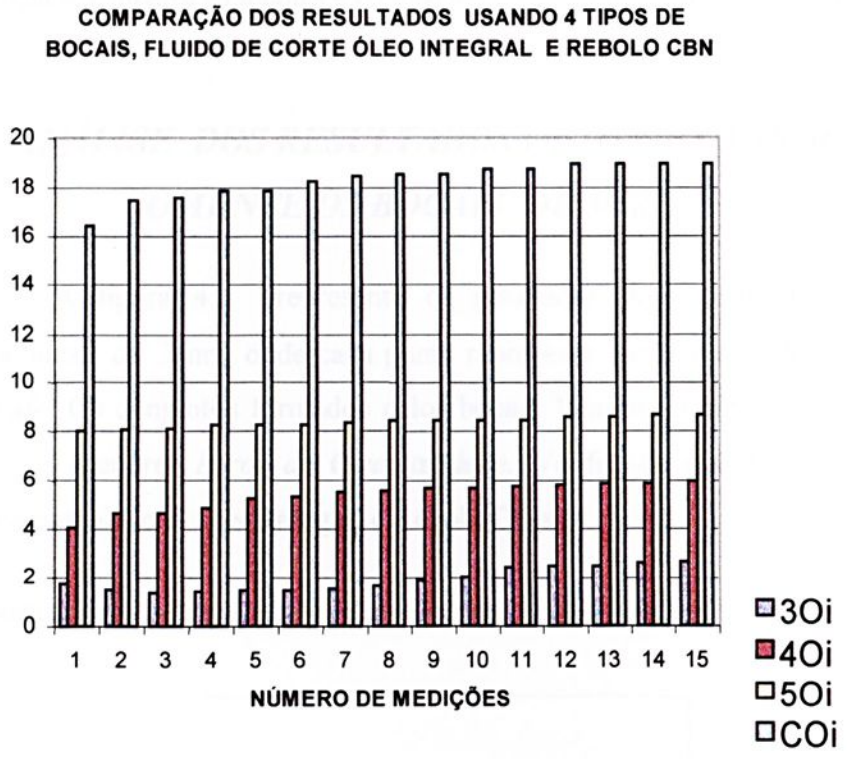


Figura 4.5 – Comparação dos resultados usando 4 tipos de bocais, fluido de corte Óleo Integral e rebolo CBN.

Grupo	*Média(µm)*	*DesvPad*
3OiC	**1,80**	**0,49**
4OiC	5,36	0,56
5OiC	8,36	0,21
COiOx	19,13	0,73

TABELA 4.21 - Resultado estatístico dos bocais, fluido de corte óleo integral e o rebolo de CBN.

O bocal 3mm apresenta melhor desempenho conforme já citado, porém em conjunto com o fluido de corte: óleo integral e com o rebolo CBN. Pode-se observar a minimização do *Erro de Circularidade* devido às

propriedades do óleo integral de lubrificar e do rebolo de CBN em dissipar o calor. A tabela 4.1 mostra as médias e os desvios-padrão dos conjuntos estudados.

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS USANDO SOMENTE OS BOCAIS DE 3mm

A figura 4.6 representa os resultados dos conjuntos usando somente os bocais de 3mm, onde cada ponto representa uma medida do *Erro de Circularidade.* Os conjuntos formados pelos bocais 3mm estão ente aqueles que apresentam os menores *Erros de Circularidade.* Verifica-se que os resultados ocorridos na combinação Óleo Integral e Rebolo CBN.

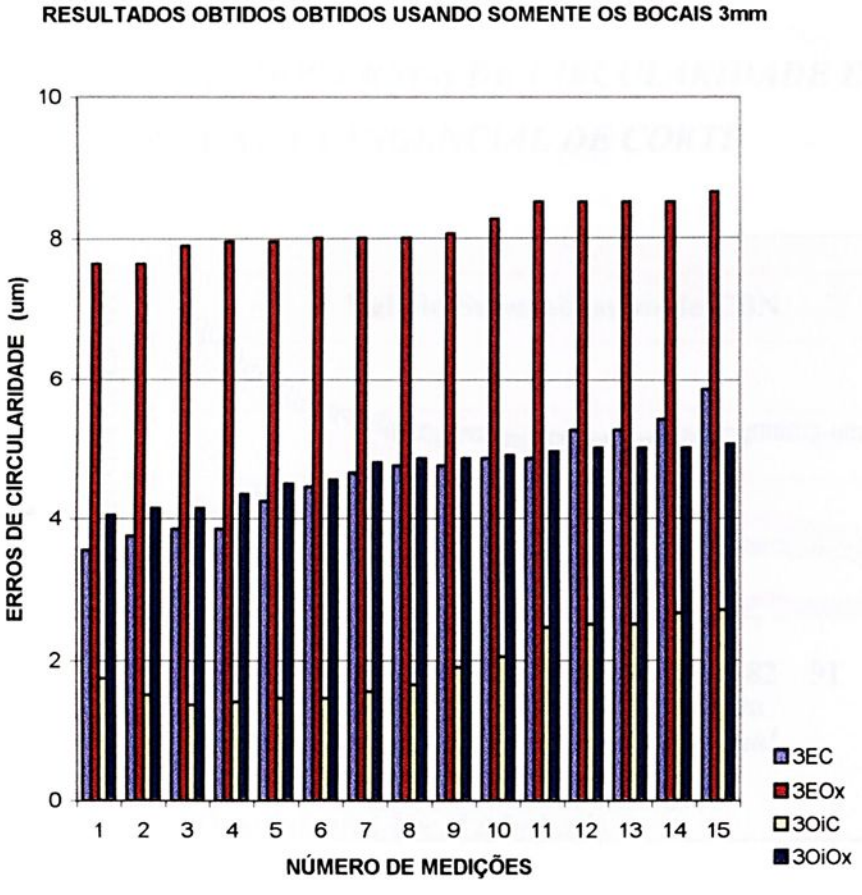


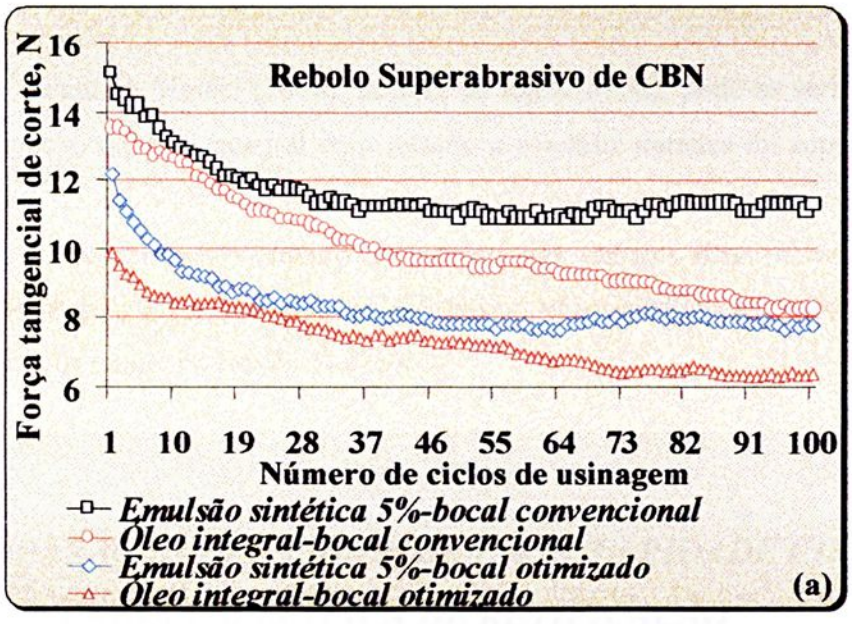
Figura 4.6 – Resultados Obtidos usando somente bocais 3mm

Grupo	Média(μm)	DesvPad
3OiC	**1,80**	**0,49**
3EC	4,62	0,67
3EOx	8,14	0,32
3OiOx	4,68	0,35

TABELA 4.22 Resultado estatístico dos bocais 3mm

A tabela 4.22 mostra as médias e as respectivos desvios-padrão dos *Erros de Circularidade* relativos aos conjuntos 3OiC, confirma a excelente performance do conjunto: bocal 3mm; fluido de corte Óleo Integral; rebolo de CBN. Em relação aos demais conjuntos de bocais de 3mm.

4.8 CORRELAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE E COM A FORÇA TANGENCIAL DE CORTE



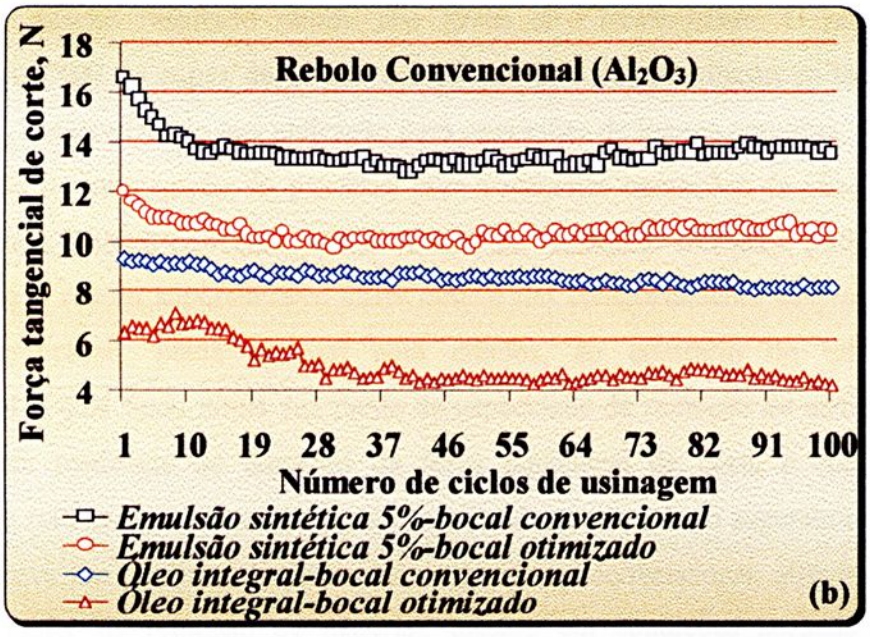


Figura 4.7- Análise comparativa entre os fluidos de corte e formas de aplicação, (a) para o rebolo superabrasivo de CBN e (b) para o rebolo convencional de óxido de alumínio (Monici 2002).

Segundo Monici (2002), através da figura (4.7a), pode-se verificar que o desempenho do óleo integral com relação à emulsão sintética foi superior nos dois casos de aplicação, principalmente quando usado em conjunto com o rebolo CBN. Este mesmo resultado foi obtido nas análises dos *Erros de Circularidade*. Pois o Óleo Integral permite uma melhor lubrificação e fixação dos grãos por mais tempo no rebolo de CBN.

4.9 COMPARAÇÃO DOS ERROS DE CIRCULARIDADE COM ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO

Ainda segundo Monici (2002), a figura (4.8), mostra o comportamento da energia específica, quando da utilização da emulsão sintética

5%. Observou-se uma diferença considerável entre os resultados de energia específica o mesmo resultado obtido nos *Erros de Circularidade*. O rebolo superabrasivo CBN foi capaz de manter sua propriedade de autoafiação ao longo do processo, caracterizando sua aplicação para operações de longos períodos, sem a necessidade de interrupção do processo para constantes operações de afiações necessárias aos rebolos convencionais de Óxido de Alumínio. Em geral pôde-se observar que o rebolo superabrasivo CBN obteve um comportamento estável ao longo do processo, pelos motivos aqui citados, ao contrário do rebolo convencional o qual ficou nítida sua perda de capacidade de remoção de material expresso pela tendência de aumento da força tangencial de corte e energia específica de retificação. A emulsão sintética utilizada com o rebolo superabrasivo de CBN obteve um rendimento nitidamente superior ao convencional, através de seu maior poder de remoção de material, mesmo em condições normais de aplicação de fluido, apresentou um rendimento semelhante com relação ao rebolo convencional e método otimizado de aplicação da emulsão sintética 5%.

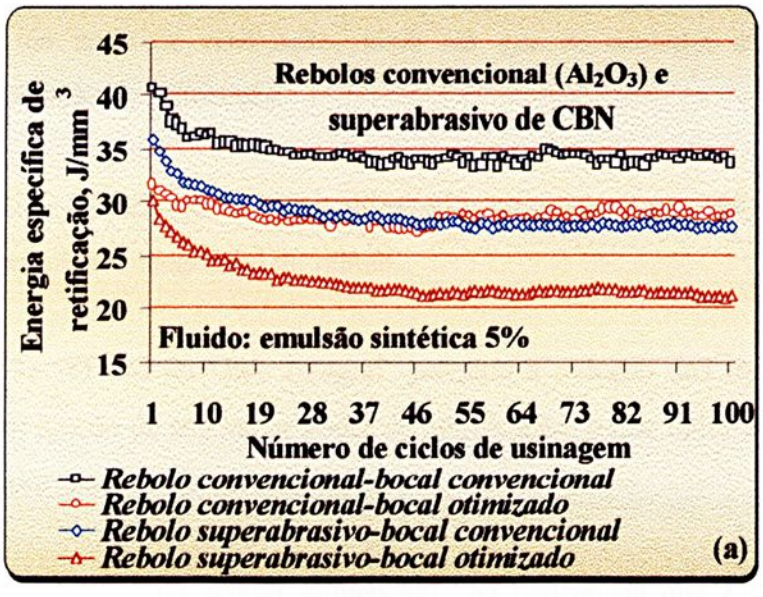


Figura 4.8 - Comparação entre o desempenho do rebolo convencional e superabrasivo de CBN (Monici 2002).

CAPITULO 5

CONCLUSÕES

A partir de diferentes tipos de análises dos bocais, fluidos de corte e os rebolos testados, pôde-se concluir que:

1) O bocal 3mm consegue penetrar na barreira aerodinâmica e introduzir fluido na zona de retificação, local em que se encontra a maior temperatura na operação de retificação.

2) Somente e os bocais otimizados conseguem uma velocidade de jato próxima velocidade tangencial do rebolo.

3) O uso do Óleo Integral permitiu a redução dos *Erros de Circularidade* em função de seu maior poder de lubrificação, o que reduz o atrito e a geração de calor na zona de retificação.

4) O tipo de rebolo influenciou na ocorrência dos *Erros de Circularidade*. A utilização do rebolo de CBN permitiu a redução dos valores dos *Erros de Circularidade* para todos os tipos de fluido testados, fato este que não ocorreu para o convencional. O melhor desempenho do rebolo de CBN deve-se,

unesp

principalmente: a maior dureza de seus grãos, o que reduz o desgaste e favorece o corte, gerando menos calor na região de corte e à maior condutividade térmica destes, possibilitando uma menor partição de energia. A análise dos resultados obtidos, o rebolo mais adequado para a retificação do aço VC 131 com 60 HRc seria o de CBN.

5) Já quanto à escolha do tipo de fluido de corte mais adequado, a primeira escolha seria a utilização do óleo de corte. Todavia, dentre os fluidos testados, o óleo de corte é o mais insalubre, sendo necessária à utilização de equipamentos de proteção individual (EPI), evitando o contato prolongado.



SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) A construção de corpos de provas utilizando algum mecanismo que permita a destruição da barreira aerodinâmica.

2) Efetuar todo esse processo usando bocais de 2mm, 1mm e 0,5mm e medir a vazão com (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 e 1) da velocidade do jato para cada bocal e assim verificar os *Erros de Circularidade,* e também comprovar a eficiência da MQR.

3) Avaliação microestrutural das amostras analisadas de tensão residual, buscando-se associar o tipo de tensão presente com possíveis alterações microestruturais, decorrentes da re-austenitização do material e seu subseqüente resfriamento.

4) Difusão e implementação de sistemas de monitoramento que permitam um correto condicionamento inicial do rebolo de CBN, um balanceamento adequado e um contato rebolo-peça uniforme durante a retificação, já que desempenho deste rebolo é fortemente influenciado por estes fatores.

4) O desenvolvimento de EPI para operador de retificadora, principalmente com relação à proteção de suas vias respiratórias, já que existem divergências quanto aos danos que a inalação da névoa gerada pode trazer.

5) A construção de um rebolo que possa introduzir fluidos dentro da zona de retificação a exemplos de brocas que introduzem fluidos dentro da zona de furação.

6) Medir os *Erros de Circularidade* antes da operação de retificação.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Mechanical Engineers, 1982. ANSI/ASME Y14.5M, Dimensioning and Tolerancing. New York,

BENNETT, B. "Cutting Fluids and Superabrasives Applications", Cincinnati Milacron, AES Magazine, p-12.

BIANCHI, E.C. Ação da geometria teórica do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante resinóide. São Carlos, 1992. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos/ USP.

BLACKSHAW D.M.S., Machine tool accuracy and repeatability A new approach with the revision of IS0 230–2, geometric errors, International Journal of Production Research 35 (12) (1997) 3415–3432.

BLENKOWSKI, K., "Coolants & lubricants – Staying pure" Manufacturing Engineering, April 1993, p.55-61.

BRYAN, J., International status of thermal error research, Annals of the CIRP 39 (2) (1990) 645–656.

DEMETER E.C., HOCKENBERGER M.J., The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error, International Journal of Production Research 35 (12) (1997)

DONMEZ M.A, A general methodology for machine tool accuracy enhancement: theory, application and implementation, machine tools, PhD dissertation, University of Wisconsin–Madison, 1987.

EVANS, C.J., KOCKEN, R.J., Self-calibration: reversal, redundancy, error separation and absolute testing, Annals of the CIRP 45 (1996) 617-632.

ENGINEER, F.; GUO, C.; MALKIN S., "Experimental Measurement of the Cooling Flow through the Grinding Zone" ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, 1992, p.51.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

FREEMAN J.M., FORD D.G., The analysis of geometric and thermal errors of on-CARTESIAN MSTRUTURES, Proc #rd Int. Conf on Laser Metrology and Machine Performance – LAMDAMAP, 1997.

GUO, C.; MALKIN, S. "Effectiveness of Cooling in Grinding". CIRP Annual Convention, STG, Eschewed, 1992.

JEDRZEJEWSKI J., MODRZYCKI W., Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools, Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, 1997, pp. 457–462.

JÚNIOR F. J., "Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed" São Carlos: EESC-USP, 1992. 190p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - ESC-USP, 1996. (Orientador: João Fernando Gomes de Oliveira).

KOHLI S.P., GUO, C.; MALKIN, S. "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels". ASME Journal of Engineering for industry, Vol. 117, 1995, p. 160-168

KONIG, W., MESSER, J. —Afiação De Rebolos De Óxido De Alumínio com Ferramentas de Afiação Estáticas. Tradução da empresa bert Bosch, Campinas. 1980. 12p.

KOVACEVIC, R; MOHAN R. "Effect of high speed grinding fluid on surface grinding performance". SME Technical paper MR95-213, 1995, p. 919-931.

LAVINE A.S., MALKIN S., Thermal aspect of grinding the effect of heart generation at the shear planes creap annal (1996)

MACHADO A. R., COSTA C.D."Nitreto de cúbico de boro policristalino para usinar materiasis endurecidos". Revista Máquinas e Metais, p. 30-40, abril de 2002.

MALKIN, S. "Grinding Mechanisms" e "Grinding Temperatures and Thermal Damage", in: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and aplications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, EllisHorwood Limited, 1989. Cap. 5 e 6, p.108 a 171.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

MALKIN, S. "Thermal Aspects of Grinding, Part 2 – Surface Temperatures and Workpiece Burn", Trans., ASME, J of Eng. For Ind., 96, 1974, p. 482.

MALKIN, S. COOK J.S., "Current Trends in CBN Grinding Technology", Annals of the CIRP. 34/1, 1971, p. 557-560.

MINKE, E. "Contribution to the Role of Coolants on Grinding Process and Work Results" 3rd International Machining & Grinding Conference, October 4-7 of 1999, Westin Hotel * Cincinnati, Ohio.

MONICI, R. D., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R. Análise das diferentes formas de aplicação e tipos de fluido de corte utilizados no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho através de rebolos convencionais e superabrasivos de CBN. In: USINAGEM 2002 Feira e Congresso; São Paulo - SP (Expo Center Norte - Pavilhão Verde), 29 a 31 de outubro de 2002. Anais do USINAGEM 2002 Feira e Congresso. São Paulo: Revista Máquinas e Metais, 17 páginas (em CD - ROM).

MOTTA, M. F., MACHADO A. R. "Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção". Revista Máquinas e Metais, p. 44-56, setembro de 1995.

NI, J., Study on online identification and forecasting compensatory control of volumetric errors for multiple axis machine tools, PhD dissertation, University of Wiconsin-Madison, 1987.

NOVASKI, O., DÖR, J. "Usinagem quase a seco" Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVI, nº 406, p 34-41, Novembro - 1999.

OLIVEIRA J° F.G. de. Análise da Ação Macroefeito de Dressagem de Rebolo no Desempenho do Processo de Retificação.Tese de doutorado, Escola de, Engenharia Carlos- USP, 1988. 272p.

RIOS, M. R.S., Estudo do Comportamento do Fluido Sintético na função de Aço Inoxidável, Campinas: Faculdade e Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 95 p. Dissertação de Mestrado.



RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. "Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle" Triboconcept – Edições Técnicas, 1990, p. 71-171,

SHAW, M. "Heat-affect Zones in Grinding Steels". Annals of the CIRP, v 43/1, 1994, p. 279-282.

SILVA G., "Tópicos Importantes na Retificação de Precisão". Revista Caderno de Tecnologia ed. Escola Paula Souza, p.16-25, abril 1994.

SLOCUM A.H., Precison Machine Design, Pretice Hall 1992.

SREEJOTH S.W., Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools, Annals of the CIRP 35 (1) (1986) 255–258

TAYLOR-HOBSON (2001)- Manual da máquina TAYROND 31C (MANUAL DIDÁTICO FORNECIO PELA A EMPRESA).

TÖNSHOFF, H. K.; GRABNER, T. "Cylindrical and Profile Grinding with Boron Nitride Wheels" Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tókio, 1984, p. 326-343.

VANSEVENANT, IR. E. "Na Improved Mathematical Model to Predict Residual Stresees in Surface Plunge Grinding", Annals of the CIRP., 36, 1989, p. 413-416.

VIEIRA M. JR., LIBARDI R., CANCILIERI H.A. E LIMA A., (1.999) "Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças". Revista Máquinas e Metais, p. 28-36, fevereiro de 1999.

WEBSTER, J. "Optimizing coolant application systems for high productivity grinding" ABRASIVES Magazine, October/November de 1999.

WEBSTER, J., CIU, C. "Flow Rate and Jet Velocity Determination for Design of a Grinding Cooling System" presented at 1st International Machining ε Grinding conference, September 12-14, 1995, Dearborn, MI.

YASUI, H.; TSUKUDA, S. "Influence of Fluid Type on Wet Grinding Temperature", Bull. Japan Soc. of Precision Engineering., n.2, vol. 17, 1983, p. 133-134.



YUAN J., NI J., The real-time error compensation technique for CNC machining systems, Mechatronics 8 (1998).

YUAN J., YANG S., NI J., The improvement of thermal error modelling and compensation on machine tools by CMAC neural network, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36 (4) (1998) 527–537.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18


0810001096