

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***BRUNIMENTO EM FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO
FERRAMENTAS TIPO BUCHA COM GRÃOS DE DIAMANTE***

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCO ANTONIO SCHMIDT

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1999

**BRUNIMENTO EM FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO
FERRAMENTAS TIPO BUCHA COM GRÃOS DE DIAMANTE**

MARCO ANTONIO SCHMIDT

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE :

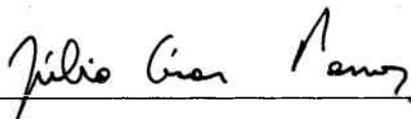
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.

Orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador do Curso

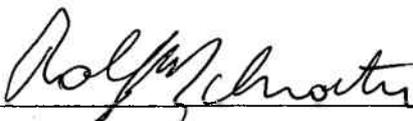
BANCA EXAMINADORA



Prof. Abelardo A. de Queiroz, Ph. D



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.



Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

A Gemma e Adelino
A Clara e Ari

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eng. Lourival Boehs, pelo apoio, incentivo e orientação deste trabalho.

À empresa Mannesmann Rexroth Automação Ltda., pelo empréstimo dos equipamentos e fornecimento das ferramentas e material utilizados neste trabalho.

Ao Eng. Edson Duwe e ao Sr. Jesus Navarro Alcalde pelo incentivo.

Ao Eng. Joseph Antich, pelo apoio e informações técnicas prestadas.

Ao CERTI, pela disponibilidade de equipamentos e pessoal para medição das peças.

Ao Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, pelo auxílio prestado.

Aos colegas da Mannesmann Rexroth Automação Ltda., pela colaboração na realização dos ensaios e preparação dos corpos de prova.

Ao Eng. Delmonte N. Friedrich, ao tecnólogo Romário S. Santos, M. Eng. Mec. e ao bolsista Fabiano Mocelin, pela colaboração na preparação dos corpos de prova para análise microscópica.

Ao Eng. Ademir e ao técnico Maurício do CERTI, pela presteza demonstrada na realização da medição dos diâmetros dos corpos de prova.

À minha segunda família, Clara, Ari, Ítalo Augusto e Paulo César, por terem me acolhido em seu lar durante muitos anos com amor e indispensável apoio.

Aos meus pais Gemma e Adelino, ao meu irmão Emerson e à minha avó Santa, pela tranquilidade familiar que sempre nos une.

À Karin Rosani, pela demonstração de amor e compreensão.

ÍNDICE

SIMBOLOGIA.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xviii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
1 Introdução.....	1
2 Objetivos do trabalho	6
3 Abrasivos	8
3.1 Usinagem com grãos abrasivos.....	8
3.2 Materiais abrasivos e ligantes	12
3.2.1 Abrasivos.....	13
3.2.2 Ligantes.....	17
4 Os diversos processos de brunimento	20
4.1 Brunimento de curso curto.....	20
4.2 Brunimento de curso longo.....	28
4.3 Comparação entre o brunimento e outros processos.....	30
5 Grandezas de entrada e resultados do processo de brunimento.....	32
5.1 Resultados do brunimento sobre as características da peça.....	33
5.2 Influências dos parâmetros variáveis sobre o resultado do brunimento.....	35
5.2.1 Influências da velocidade de corte sobre o resultado do brunimento.....	35
5.2.2 Influências do curso sobre o resultado do brunimento	38
5.2.3 Influências da pressão de contato sobre o resultado do brunimento	40
5.3 Influências do sistema de trabalho sobre o resultado do brunimento	41

5.3.1 Características da máquina e dispositivos de fixação e suas influências sobre o resultado do brunimento.....	42
5.3.2 Características da peça e suas influências sobre o resultado do brunimento.....	47
5.3.3 Características da ferramenta e suas influências sobre o resultado do brunimento.....	49
5.3.4 Características dos meios auxiliares e suas influências sobre o resultado do brunimento.....	53
6 Brunimento de passe único e desenvolvimentos recentes.....	58
6.1 Características do brunimento de passe único.....	58
6.1.1 Ferramentas tipo “Precidor”.....	63
6.1.2 Ferramentas tipo bucha superabrasiva.....	64
6.1.3 Dados práticos empregados no brunimento de curso longo de passe único.....	66
6.2 Brunimento com LASER.....	69
6.3 Brunimento de alta frequência.....	71
6.4 Brunimento de passe único externo.....	73
6.5 Máquinas CNC de brunimento.....	74
6.6 Brunimento por extrusão.....	75
7 Textura e integridade em superfícies brunidas.....	76
7.1 Textura da superfície brunida.....	76
7.1.1 Medição da textura de superfícies brunidas.....	78
7.1.2 Análise da textura de superfícies brunidas.....	83
7.2 Integridade da superfície brunida.....	87
8 Equipamentos, materiais e metodologia.....	88
8.1 Considerações iniciais.....	88
8.2 Materiais e equipamentos utilizados.....	88
8.2.1 Peça.....	88
8.2.2 Ferramenta.....	90
8.2.3 Máquina.....	98

8.2.4 Dispositivos de fixação.....	98
8.2.5 Óleo de corte.....	98
8.2.6 Equipamentos de medição e de microscopia.....	98
8.3 Análise estatística.....	100
8.3.1 Determinação do tipo de distribuição estatística da amostra.....	101
8.3.2 Cálculo do tamanho da amostra.....	103
8.3.3 Experimentos fatoriais.....	105
8.3.4 Teste múltiplo de Duncan.....	108
9 Apresentação e análise dos resultados.....	111
9.1 Influências dos parâmetros de entrada sobre o resultado do brunimento – Ferramenta de desgaste.....	111
9.1.1 Determinação dos parâmetros de entrada.....	111
9.1.2 Seleção dos corpos de prova e realização dos ensaios.....	116
9.1.3 Resultados do processo referentes à variação do diâmetro do furo brunido.....	118
9.1.4 Resultados do processo referentes ao erro de circularidade do furo brunido.....	122
9.1.5 Resultados do processo referentes ao erro de cilindricidade do furo brunido.....	127
9.1.6 Resultados do processo referentes à rugosidade do furo brunido.....	130
9.1.7 Resumo dos resultados do experimento.....	139
9.2 Otimização do processo de brunimento para as ferramentas de semi-acabamento e de acabamento.....	141
9.2.1 Otimização da velocidade periférica para as ferramentas de semi-acabamento e de acabamento.....	142
10 Comprovação estatística dos resultados do processo de brunimento.....	147
10.1 Erro de cilindricidade.....	147
10.2 Diâmetro do furo.....	150
10.3 Rugosidade R_a	153
10.4 Rugosidade R_z	157
10.5 Rugosidade R_{max}	162

11 Avaliação das superfícies brunidas	166
11.1 Superfície alargada	167
11.2 Superfícies e características geométricas produzidas pelo brunimento com ferramenta de desbaste sem dressamento da camada abrasiva	169
11.3 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta de desbaste	172
11.4 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta semi-acabamento	176
11.5 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta de acabamento	178
11.6 Integridade das superfícies geradas pelo brunimento de passe único	187
12 Conclusões e sugestões para futuros trabalhos	190
12.1 Conclusões	190
12.2 Sugestões para futuros trabalhos	192
13 Referências bibliográficas	194
Anexos	202

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

SIMBOLOGIA

f	Hz	Frequência da oscilação
h	μm	Amplitude da oscilação
l_u	mm	Comprimento livre da ferramenta
n	min^{-1}	Rotação da ferramenta
n	-	Número de medidas
s	-	Desvio-padrão da amostra
t	s	Tempo de contato
t	-	Coefficiente de Student
v_a	m/min	Velocidade axial
v_c	m/min	Velocidade de corte
v_o	m/min	Velocidade de oscilação
v_r	m/min	Velocidade periférica
v_{res}	m/min	Velocidade resultante
v_u	m/min	Velocidade tangencial
v_{us}	m/min	Velocidade de oscilação axial
\bar{x}	-	Média da amostra
x_i	-	Medida individual
z	-	Valor padrão normalizado
A	mm^2	Área de abrasivos na ferramenta
A	μm	Amplitude da oscilação da ferramenta
D	mm	Diâmetro da ferramenta
E	-	Frequência amostral esperada
F_n	N	Força normal
F_o	N	Força de contato
F_t	N	Força tangencial
F_u	N	Força de contato
$F(z)$	-	Função distribuição normal
IM	-	Incerteza de medição

MR_{min}	μm	Quantidade mínima de material removido
MS	-	Quadrado médio
P	N/mm^2	Pressão específica
R_a	μm	Valor médio de rugosidade
R_k	μm	Profundidade da rugosidade central
R_{max}	μm	Profundidade máxima individual de rugosidade
R_{pk}	μm	Altura de pico reduzida
$R\rho$	-	Gama mínima significativa
R_{vk}	μm	Profundidade de vale reduzida
R_y	μm	Altura máxima do perfil
R_z	μm	Profundidade média de rugosidade
S	-	Erro padrão
SS	-	Soma dos quadrados
V_{usin}	mm^3	Volume de material usinado
Z	mm^3/s	Taxa de remoção de material
Z'	$mm^3/s.mm$	Taxa específica de remoção de material
Z''	$mm^3/s.mm^2$	Taxa específica de remoção de material por unidade de área
α	graus	Ângulo de cruzamento das estrias
γ	graus	Ângulo de saída da ferramenta
σ	-	Desvio padrão da população
χ^2	-	Distribuição Qui-quadrado
v	-	Graus de liberdade da amostra

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS QUÍMICOS

Al_2O_3	-	Óxido de alumínio
CBN	-	Nitreto de boro cúbico
Cr_2O_3	-	Óxido de cromo
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
FEPA	-	Federação Européia de Fabricantes de Abrasivos
LASER	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

MEV	-	Microscópio eletrônico de varredura
SiC	-	Carboneto de silício
ZrO ₂	-	Óxido de zircônio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Gumes de corte geometricamente indefinidos	2
Figura 1.2 – Brunimento de curso longo: máquina, ferramentas e características do processo	4
Figura 3.1 – Comparação entre os gumes de corte de ferramenta de geometria definida e ferramenta de geometria não-definida	8
Figura 3.2 – Formas de ação para a penetração de um gume abrasivo	9
Figura 3.3 – Processo de formação de cavaco no brunimento	10
Figura 3.4 – Fluxo de calor gerado durante o processo de formação de cavaco	11
Figura 3.5 – Formas de desgaste no grão abrasivo e ligante	12
Figura 3.6 – Superabrasivos.....	18
Figura 4.1 – Correção do erro de forma de acordo com a geometria inicial da peça	20
Figura 4.2 – Processo de auto-afiação da pedra abrasiva durante o processo	21
Figura 4.3 – Componentes da velocidade no brunimento de curso curto	22
Figura 4.4 – Movimentos mecânicos no superacabamento.....	23
Figura 4.5 – Brunimento de curso curto entre pontas	24
Figura 4.6 – Brunimento de curso curto “centerless”	25
Figura 4.7 – Brunimento manual “centerless”.....	26
Figura 4.8 – Brunimento de perfis	27
Figura 4.9 – Brunimento plano	28
Figura 4.10 – Textura da superfície gerada pelo brunimento de curso longo de passe único e convencional	29
Figura 4.11 – Taxa específica de remoção de material em aço temperado com diversos tipos de abrasivos	31
Figura 5.1 – Características do processo de brunimento.....	32
Figura 5.2 – Definição de circularidade	34
Figura 5.3 – Definição de cilindricidade	34
Figura 5.4 – Comparação entre dimensões.....	35
Figura 5.5 – Cinemática do processo de brunimento convencional.....	36
Figura 5.6 – Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade	38

Figura 5.7 – Influência do curso sobre o erro de cilindridade	39
Figura 5.8 – Efeito da pressão de contato específica sobre a taxa de remoção de material	40
Figura 5.9 – Remoção de material, desgaste da ferramenta e rugosidade R_y em função da pressão de contato.....	42
Figura 5.10 – Representação do tombamento da ferramenta de brunir no furo da peça.....	43
Figura 5.11 – Efeito de flutuação dos dispositivos de fixação	44
Figura 5.12 – Fixação de ferramenta tipo dupla junta universal.....	45
Figura 5.13 – Dispositivo de fixação de peças tipo pendular	46
Figura 5.14 – Erros em furos que podem ser corrigidos pelo brunimento	48
Figura 5.15 – Ferramenta de brunimento manual	50
Figura 5.16 – Ferramenta para brunir furos com rasgo de chaveta.....	50
Figura 5.17 – Ferramentas para brunimento de curso longo	51
Figura 5.18 – Influência do comprimento das pedras abrasivas sobre o erro de cilindridade.....	53
Figura 5.19 – Influência da largura da pedra abrasiva sobre o erro de circularidade	54
Figura 5.20 – Controles automáticos da dimensão do furo durante o processo de brunimento.....	57
Figura 6.1 – Ferramenta de brunir de passe único	59
Figura 6.2 – Exemplo de utilização de ferramentas de brunir de passe único.....	60
Figura 6.3 – Erro de circularidade produzido pela fixação rígida	61
Figura 6.4 – Aparência das camadas abrasivas dressadas com diamante	63
Figura 6.5 – Ferramenta “Precidor”	63
Figura 6.6 – Diferentes construções de ferramentas de brunir de passe único.....	67
Figura 6.7 – Processo de brunimento com LASER	70
Figura 6.8 – Equipamento para brunimento com estruturação superficial com LASER.....	70
Figura 6.9 – Utilização do cabeçote LASER e superfícies obtidas pelo processo	71
Figura 6.10 – Cinemática do brunimento de alta frequência e textura da superfície produzida pelo processo	72
Figura 6.11 – Brunimento por extrusão.....	75
Figura 7.1 – Textura e integridade de superfície	76
Figura 7.2 – Filtragem do perfil de rugosidade separando a rugosidade da ondulação	77
Figura 7.3 – Sistemas de apalpação com superfície de referência e com patim.....	79
Figura 7.4 – Influência do raio da agulha apalpadora e do diâmetro do feixe LASER	79

Figura 7.5 – Medição de rugosidade de superfície brunida e retificada com valores semelhantes e perfis diferentes	80
Figura 7.6 – Geração de uma superfície platafórmica.....	82
Figura 7.7 – Definição dos parâmetros R_k	82
Figura 7.8 – Interpretação gráfica dos parâmetros de rugosidade para descrição de superfícies de cilindros de motores de combustão interna	84
Figura 7.9 – Textura da superfície produzida pelo processo de brunimento convencional e de passe único.....	85
Figura 7.10 – Textura superficial de superfícies brunidas evidenciando defeitos superficiais e marcas de desgaste.....	86
Figura 8.1 – Aspecto micrográfico do ferro fundido cinzento GG30 e análise química da superfície.....	89
Figura 8.2 – Vista em corte da peça utilizada nos experimentos.....	90
Figura 8.3 – Dados do processo de brunimento de válvulas hidráulicas.....	91
Figura 8.4 – Componentes e detalhes construtivos da ferramenta utilizada	92
Figura 8.5 – Seção transversal da bucha abrasiva.....	92
Figura 8.6 – Análise química do ligante utilizado nas ferramentas de brunir	93
Figura 8.7 – Detalhes construtivos das ferramentas de brunir utilizadas	94
Figura 8.8 – Superfície das buchas abrasivas mostrando os grãos de diamante.....	95
Figura 8.9 – Detalhes construtivos da bucha abrasiva	95
Figura 8.10 – Grãos de diamante da ferramenta de desbaste antes da operação de dressamento e após a operação de dressamento	96
Figura 8.11 – Exposição da porção de corte dos grãos de diamante D150 e D30.....	97
Figura 8.12 – Máquina de brunir utilizada nos ensaios.....	99
Figura 8.13 – Medição de circularidade, cilindridade e do diâmetro.....	100
Figura 9.1 – Dimensões da ferramenta de brunir de desbaste	112
Figura 9.2 – Curso da ferramenta de brunir de passe único	113
Figura 9.3 – Efeitos da rugosidade superficial na medição do erro de circularidade	115
Figura 9.4 – Efeitos da rugosidade superficial na medição do erro de cilindridade	115
Figura 9.5 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o diâmetro do furo	119
Figura 9.6 – Efeito dos níveis da variável sobremetal sobre o diâmetro do furo	120
Figura 9.7 – Furo com formato de ampulheta	121
Figura 9.8 – Efeito do curso da ferramenta sobre o diâmetro dos colos da peça	122

Figura 9.9 – Efeito do “chicoteamento” da ferramenta devido ao curso e à área de apoio.....	123
Figura 9.10 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o erro de circularidade do furo	124
Figura 9.11 – Efeito dos níveis das variáveis velocidade axial, erro de cilindridade inicial e curso sobre o erro de circularidade do furo	126
Figura 9.12 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o erro de cilindridade do furo	128
Figura 9.13 – Efeito dos níveis das variáveis significantes sobre o erro de cilindridade do furo	130
Figura 9.14 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_a do furo medida com apalpador mecânico	133
Figura 9.15 – Efeito dos níveis das variáveis significativas sobre a rugosidade R_a – apalpador mecânico.....	134
Figura 9.16 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_z do furo medida com apalpador mecânico	135
Figura 9.17 – Efeito dos níveis das variáveis significativas sobre a rugosidade R_z – apalpador mecânico.....	135
Figura 9.18 – Remoção de material do diâmetro do furo insuficiente para a eliminação de riscos provenientes da operação anterior	136
Figura 9.19 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_a do furo medida com apalpador ótico	137
Figura 9.20 – Efeito dos níveis das variável velocidade periférica sobre a rugosidade R_a – apalpador ótico.....	137
Figura 9.21 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_z do furo medida com apalpador ótico	138
Figura 9.22 – Efeito dos níveis das variáveis velocidade periférica e velocidade axial sobre a rugosidade R_z – apalpador ótico	139
Figura 10.1 – Erros de cilindridade obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – condição 1	148
Figura 10.2 - Erros de cilindridade obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – condição 2	149
Figura 10.3 – Comparação dos erros de cilindridade obtidos pelo processo de brunimento com as condições de usinagem otimizadas.....	150

Figura 10.4 – Erros de cilindridade do furo conforme as etapas do processo	151
Figura 10.5 – Diâmetros obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados	152
Figura 10.6 – Comparação dos diâmetros médios dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições de brunimento otimizadas.....	153
Figura 10.7 – Valores de rugosidade R_a obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador mecânico.....	154
Figura 10.8 – Valores de rugosidade R_a obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador ótico.....	155
Figura 10.9 – Comparação dos valores de rugosidade R_a da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições otimizadas.....	156
Figura 10.10 – Valores de rugosidade R_z obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador mecânico.....	157
Figura 10.11 – Valores de rugosidade R_z obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador ótico.....	159
Figura 10.12 – Comparação dos valores de rugosidade R_z da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições otimizadas.....	160
Figura 10.13 – Medições de rugosidade R_z da superfície dos furos realizadas nas etapas de alargamento e brunimento de desbaste – apalpador ótico	161
Figura 10.14 – Valores de rugosidade R_{max} obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador mecânico.....	163
Figura 10.15 – Valores de rugosidade R_{max} obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – apalpador ótico.....	164
Figura 10.16 – Comparação dos valores de rugosidade R_{max} da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições otimizadas.....	165
Figura 11.1 – Escova utilizada para acabamento de superfícies brunidas	167
Figura 11.2 – Superfície alargada	168
Figura 11.3 – Seções realizadas nos corpos de prova para análise microscópica.....	168
Figura 11.4 – Fotografia da seção longitudinal do furo alargado	169
Figura 11.5 – Erros de circularidade e cilindridade produzidos pelo brunimento de desbaste com ferramenta sem dressamento dos grãos abrasivos.....	171
Figura 11.6 – Textura superficial produzida pelo brunimento de desbaste com ferramenta sem dressamento dos grãos de diamante	171

Figura 11.7 – Fotografia da seção longitudinal e transversal do furo brunido com ferramenta de desbaste sem dressamento dos grão de diamante	172
Figura 11.8 – Fotografias e caracterização tridimensional da superfície brunida – D150	173
Figura 11.9 – Fotografia da textura e defeitos da superfície brunida – D150	174
Figura 11.10 – Distribuição irregular dos grãos de diamante na ferramenta	176
Figura 11.11 – Picos de rugosidade devido ao material dobrado sobre a superfície brunida	177
Figura 11.12 – Superfícies obtidas com ferramenta de semi-acabamento D50	179
Figura 11.13 – Superfícies obtidas com ferramenta de acabamento D30	180
Figura 11.14 – Perfis de rugosidade das superfícies analisadas	181
Figura 11.15 – Curvas dos parâmetros de rugosidade da família Rk para o processo de brunimento	182
Figura 11.16 – Superfícies produzidas pelo brunimento de acabamento e superfícies escovadas	185
Figura 11.17 - Superfícies produzidas pelo brunimento de acabamento e superfícies escovadas	186
Figura 11.18 – Aspectos da textura e integridade das superfícies brunidas	188
Figura 11.19 – Deformação sub-superficial do material causado pelo processo de brunimento	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparativo entre normas de classificação do tamanho dos grãos abrasivos	14
Tabela 3.2 – Comparativo de propriedades físicas e químicas dos abrasivos	15
Tabela 6.1 – Velocidades de corte recomendadas para o brunimento de passe único	67
Tabela 6.2 – Remoção de material obtida no brunimento de passe único	68
Tabela 6.3 – Rugosidades R_a e R_z obtidas com o brunimento de passe único	68
Tabela 8.1 – Composição química do ferro fundido cinzento GG30	89
Tabela 8.2 – Montagem e notações utilizadas em um experimento fatorial 2^3	106
Tabela 8.3 – Montagem de um experimento fatorial 2^{5-1}_v	107
Tabela 8.4 – Análise de variância para experimentos fatoriais fracionados 2^{k-1}	109
Tabela 9.1 – Resumo do planejamento do experimento fatorial	116
Tabela 9.2 – Peças selecionadas para o experimento com suas características iniciais	118
Tabela 9.3 – Resultados obtidos nas medidas do diâmetro e a remoção de material no diâmetro do furo para cada ferramenta utilizada	119
Tabela 9.4 – Análise de variância para o efeito significativo sobre o diâmetro do furo	120
Tabela 9.5 – Resultados obtidos nas medidas do erro de circularidade do furo	124
Tabela 9.6 – Análise de variância para os efeitos significativos sobre o erro de circularidade do furo	125
Tabela 9.7 – Resultados obtidos nas medidas do erro de cilindridade do furo	127
Tabela 9.8 – Análise de variância para os efeitos significativos sobre o resultado da cilindridade do furo	128
Tabela 9.9 – Valores de rugosidade R_a e rugosidade R_z obtidos com apalpador mecânico	131
Tabela 9.10 – Valores de rugosidade R_a e rugosidade R_z obtidos com apalpador ótico	132
Tabela 10.1 – Parâmetros de entrada selecionados para a comprovação estatística do brunimento com ferramentas tipo bucha diamantada	147
Tabela 11.1 – Medição da textura da superfície alargada	167
Tabela 11.2 – Medições de rugosidade das amostras - alargamento	170

Tabela 11.3 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramenta sem condicionamento dos grão de diamante	170
Tabela 11.4 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramentas de desbaste	175
Tabela 11.5 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramentas de semi-acabamento	177
Tabela 11.6 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramentas de acabamento.....	178
Tabela 11.7 – Valores de rugosidade medidos em superfícies brunidas e escovadas.....	182

RESUMO

Muitos corpos técnicos utilizados em componentes automotivos, máquinas industriais, aeronaves e em uma série de outras aplicações, exigem extrema confiabilidade e elevado desempenho ao realizar as funções para as quais foram projetados. Entre esses componentes encontram-se as válvulas hidráulicas direcionais. As carcaças dessas válvulas, construídas em ferro fundido cinzento, particularmente o furo central em que atua o êmbolo de comando, foram objeto de estudo deste trabalho. Para cumprir os requisitos de confiabilidade e desempenho são necessários furos com grande precisão dimensional e de forma, além de superfícies com textura e integridade especiais e bem controladas. Tais características, na maioria das vezes, requerem cuidados redobrados, bem como processos de usinagem e ferramentas específicas, citando-se o brunimento de curso longo e as ferramentas tipo bucha com abrasivos de diamante natural, utilizados neste trabalho. A pesquisa procurou determinar e quantificar os efeitos dos parâmetros de entrada do processo de brunimento, com o citado tipo de ferramenta, que são a cilindridade inicial, o sobremetal do furo, a velocidade de corte e o curso da ferramenta, sobre as características finais dos furos das válvulas, dentre as quais: cilindridade, variação do diâmetro, a textura e a integridade da superfície do furo. Os resultados obtidos mostram que as características geométricas e dimensionais são prejudicadas pelo aumento da velocidade de corte, curso da ferramenta e por grandes erros de cilindridade inicial do furo. A textura, no entanto, é beneficiada pelo aumento da velocidade de corte. A otimização do processo, com base nestes resultados, comprovou a capacidade do brunimento com ferramentas tipo bucha diamantada produzir furos com variação dimensional, precisão de forma e rugosidade R_z da ordem de $1 \mu\text{m}$. Quanto à textura e à integridade, verificou-se a ocorrência de defeitos na textura e pequenos danos à integridade da superfície dos furos.

ABSTRACT

A great number of technical components used in assemblies for further application on automotive, aircraft, machine-tools and others, require extreme reliability and high performance to comply with designed purposes. Among those components are control hydraulic valves. Valve bodies, gray cast iron made and specifically their main bore honing are the subject of this work. To achieve reliability and performance requirement, cylinder bore must be machined with extremely low tolerances to obtain designed dimensions, geometry, surface integrity and texture. Those characteristics to be consistently obtained require manufacturing skills, specific process and tools. In this research single pass bore finishing tools, using natural diamond sleeves, long stroke were used. This research aim to find and quantify effects of the initial parameters, bore cylindricity, stock removal, diamond tool speed, feed rate and stroke, on bore cylindricity, diameter, surface texture and integrity. Obtained results demonstrated that dimensional and geometrical results are adversely affected respectively by speed increase, tool stroke and high blank cylindricity tolerances. However, finish is improved by speed increase. According to results obtained, it was confirmed that single stroke diamond bore finishing tools are capable to finish bores with extremely low dimensional tolerance, overall geometry deviation under 1 μm and good surface finish. Regarding texture and integrity small damages were noticed on bore surface integrity and texture.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Foi na revolução industrial, no século XVIII, com a introdução da máquina a vapor, que nasceu a fabricação em grande escala visando atender o aumento do consumo motivado pelo crescimento da população européia. A máquina a vapor modificou profundamente os métodos de fabricação, substituindo o trabalho e a força do homem na metalurgia, na mineração, na fundição e em muitas outras funções e atividades.

Para atender a crescente necessidade de construção de máquinas, deflagrada pela revolução industrial, a fabricação de componentes mecânicos passou a ser de grande importância do ponto de vista do tempo de produção e da qualidade.

A fabricação de componentes mecânicos geralmente envolve várias etapas, desde a extração da matéria-prima, passando pela fundição, conformação (forjamento, laminação, etc.), até atingir a etapa final, que em grande parte desses componentes é realizada com processos de usinagem. No processo de conformação, ou até mesmo na fundição, a peça possui um formato próximo ao final. É na usinagem, entretanto, que serão alcançadas as dimensões, tolerâncias e qualidades de superfície impostas pelas funções que a peça irá desempenhar.

Com o passar dos anos, até os tempos atuais, a demanda por grande precisão, com tolerâncias mais apertadas dos componentes técnicos, está se tornando cada vez maior, e o grau de complexidade envolvido para satisfazer tal precisão dimensional é extremamente alto.

Satisfazer tais necessidades é um dos mais importantes desafios da engenharia de fabricação moderna. A usinagem de precisão ou de ultraprecisão, onde são possíveis de se obter tolerâncias dimensionais da ordem de $0,01 \mu\text{m}$ e rugosidade R_a da superfície de $0,001 \mu\text{m}$, não pode ser utilizada economicamente como uma simples extensão dos processos e técnicas de usinagem convencionais.

Alguns componentes, entretanto, necessitam de furos cujas dimensões devem possuir precisão da ordem de $1 \mu\text{m}$, que não podem ser obtidos por processos de fabricação convencionais como furação ou mandrilamento, mas que podem ser produzidos com processos de acabamento especiais que são viáveis economicamente.

Furos que requerem este nível de precisão para o diâmetro, retilineidade, circularidade e

cilindricidade são utilizados em aplicações particulares, como válvulas de controle de pressão da indústria de aviação e injetores de combustível de motores a diesel, entre outras.

Dentre a grande variedade de processos de acabamento existentes, os processos de usinagem com ferramentas abrasivas provaram ser capazes de produzir uma enorme gama de geometrias de peças com um fino acabamento da superfície e estreitas tolerâncias dimensionais.

Nos processos de usinagem com ferramentas abrasivas o material é removido por pequenas partículas, chamadas de grãos abrasivos. As ferramentas abrasivas, nas quais os grãos abrasivos são fixados por um ligante, são capazes de remover pequenas quantidades de material de uma superfície, produzindo pequenos cavacos, sendo o processo, por isso, geralmente denominado de acabamento.

Os grãos abrasivos possuem gumes de corte cuja geometria exata é de difícil determinação, como ilustrado na figura 1.1, dificultando a análise de seu comportamento durante a usinagem.



Figura 1.1 – Gumes de corte geometricamente indefinidos (CHRISTENSEN, 1993)

Dentre os processos de usinagem de acabamento que utilizam ferramentas de gume de geometria não-definida, destaca-se o brunimento pela sua capacidade de produzir furos com elevado grau de precisão dimensional e de forma, além de proporcionar superfícies com texturas específicas. Além disso quase todo tipo de material pode ser usinado e os furos produzidos

podem variar de diâmetros com 1 mm até diâmetros com 2000 mm e comprimentos de até 15000 mm (PAULL et. al., 1967).

O brunimento é classificado como um processo de usinagem em que a remoção de material é procedida por grãos de materiais duros, agrupados através de um ligante, que são postos em contato com o material da peça (KÖNIG, 1989). A retirada de material no brunimento é realizada pela ação de grãos abrasivos, que atuam sobre a superfície da peça a uma baixa velocidade, retirando pequena quantidade de material na forma de finos cavacos (PAULL et al, 1969).

O brunimento tem vasta aplicação industrial, sendo utilizado em diversas áreas industriais (BRÜLÉ, 1992), como por exemplo:

- indústrias automotivas: cilindros de freios, camisas do motor, engrenagens, bielas, etc.
- indústrias de equipamentos hidráulicos: cilindros hidráulicos, válvulas direcionais, etc.
- indústrias de rolamentos: pistas de rolamento.
- indústrias de equipamentos de refrigeração: blocos dos compressores, etc.
- indústrias siderúrgicas: rolos laminadores, etc.

Como já mencionado, as ferramentas utilizadas no brunimento são formadas por grãos abrasivos duros que atuam sobre a peça unidos através de um ligante. O brunimento possui duas variantes: brunimento de curso curto e brunimento de curso longo. Este último divide-se em brunimento de curso longo convencional e brunimento de curso longo de passe único.

Este trabalho teve como objeto de estudo uma dessas variantes, o brunimento de curso longo. A ferramenta empregada é classificada como ferramenta de passe único, tendo como característica construtiva a utilização de buchas metálicas recobertas com grãos de diamante natural.

A figura 1.2 apresenta um tipo de máquina empregada no brunimento de curso longo, bem como as ferramentas convencional e de passe único e o processo de remoção de material na forma de cavacos.

Embora o seu uso já se encontre bastante difundido na indústria, a aplicação deste processo é principalmente baseada na experiência prática. Além disso, como acontece com os demais processos de usinagem abrasiva, existem poucas informações quanto ao processo de brunimento com ferramentas de passe único com buchas diamantadas.

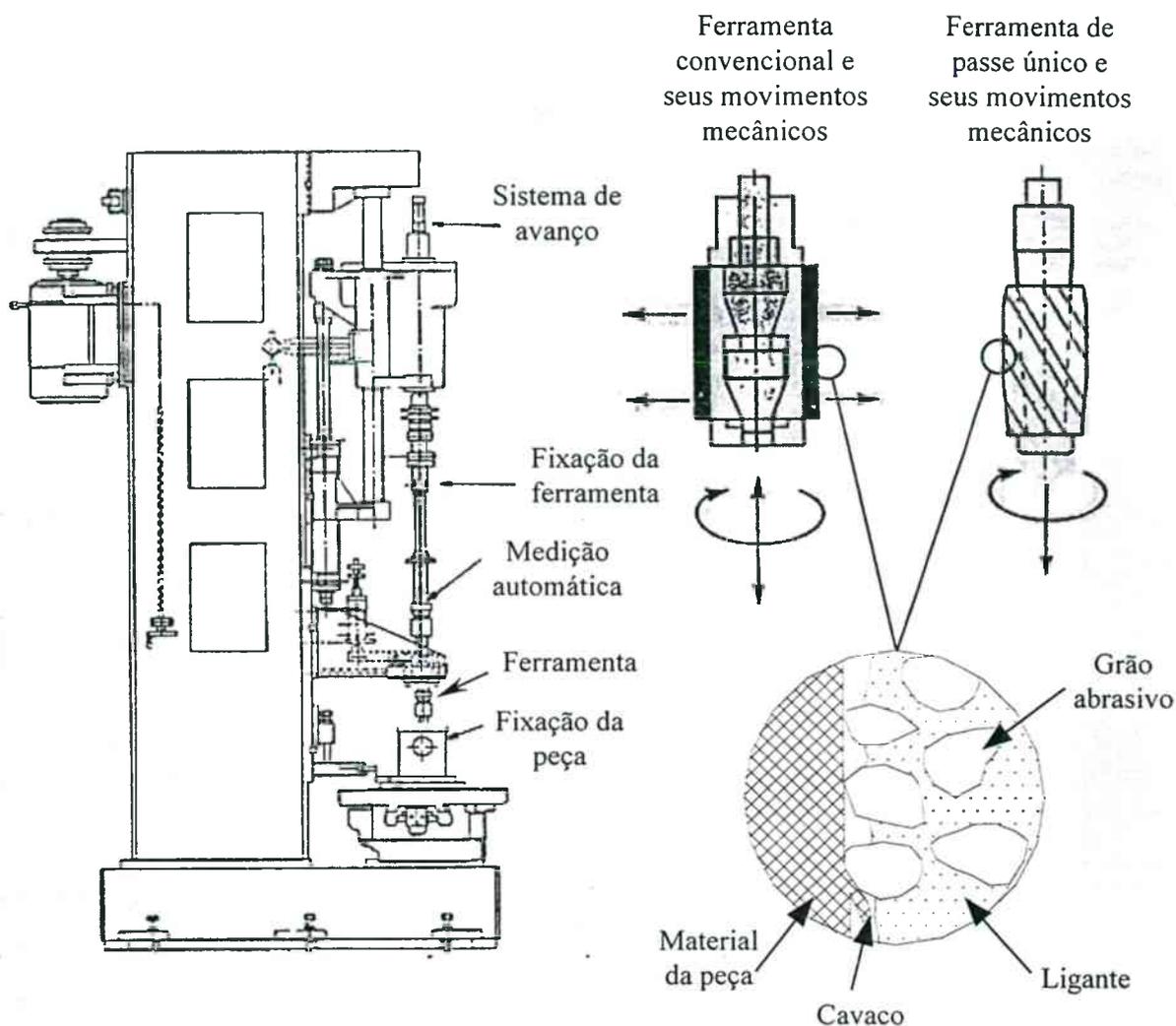


Figura 1.2 – Brunimento de curso longo: máquina, ferramentas e características do processo (PAULL et. al, 1967, MARVIN, 1994)

O presente trabalho está dividido em 14 capítulos, sendo que no capítulo 2, são apresentados os objetivos deste trabalho.

Para que seja possível um melhor entendimento do processo de brunimento deve-se, primeiramente, entender quais são os mecanismos de ação dos grãos abrasivos quando estes são colocados em contato com a superfície da peça com o objetivo de promover a retirada de material desta. Além disto, é importante conhecer, também, os materiais utilizados como abrasivos e os ligantes responsáveis pela união sólida dos grãos. Estes assuntos são apresentados no capítulo 3.

Um detalhamento sobre quais são os diferentes processos de brunimento existentes é apresentado no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta quais são as grandezas de entrada do processo que influenciam nos resultados do processo de brunimento convencional.

O brunimento de curso longo de passe único é objeto de estudo do capítulo 6, que destaca os recentes desenvolvimentos referentes a este tipo de processo de usinagem.

Texturas especiais são produzidas em superfícies através do brunimento. Tais superfícies e defeitos nelas observados são apresentados no capítulo 7.

O capítulo 8 trata dos materiais, equipamentos e métodos utilizados, bem como do planejamento experimental, que emprega técnicas estatísticas para a determinação dos parâmetros de entrada do processo que influenciam no resultado do brunimento.

Na seqüência, no capítulo 9, são apresentados e analisados os resultados da verificação experimental.

A comprovação estatística dos resultados da verificação experimental é realizada no capítulo 10.

O capítulo 11 fornece uma análise das superfícies obtidas no experimento através da medição da textura da superfície com os parâmetros de rugosidade mais adequados para o brunimento. Uma análise visual da textura e da integridade da superfície também é efetuada por intermédio de fotografias provenientes de microscopia eletrônica.

As conclusões e sugestões para novos trabalhos encontram-se no capítulo 12.

A relação das referências bibliográficas é apresentada no capítulo 13 e os anexos no capítulo 14.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DO TRABALHO

Como mencionado no capítulo anterior, o brunimento de curso longo de passe único é um processo de usinagem abrasivo largamente empregado na indústria para a produção de furos com características de alta precisão dimensional e de forma, além de produzir superfícies com texturas especiais.

Apesar de sua difundida aplicação na indústria, poucas são as informações referentes ao comportamento do processo frente às diversas combinações de condições de usinagem possíveis de serem adotadas. Na maioria das vezes os usuários do referido processo recorrem apenas à experimentação de cunho prático, baseada em tentativas, para que o processo produza os resultados desejados.

O emprego de ferramentas do tipo bucha recoberta com grãos de diamante natural, por ser um caso específico do brunimento de curso longo de passe único, faz com que as informações disponíveis, relativas a esse caso particular, tornem-se ainda mais raras. Diante de tais problemas, este trabalho tem os seguintes objetivos:

1. Determinar os efeitos das variáveis de entrada do processo de brunimento de passe único, composto pelas operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento, com ferramentas tipo bucha diamantada sobre as características dimensionais, geométricas e de textura da superfície do furo produzido;
2. Definir as combinações de variáveis de entrada que resultam nas melhores características dimensionais, geométricas e de textura da superfície do furo, visando a otimização do processo de brunimento;
3. Efetuar a comprovação estatística da otimização do processo de brunimento através da utilização de duas combinações de variáveis de entrada definidas a partir dos resultados obtidos no objetivo 2;
4. Avaliar a textura das superfícies brunidas com as ferramentas de desbaste, de semi-acabamento e de acabamento, bem como a integridade das superfícies brunidas com a ferramenta de desbaste sem dressamento dos grãos abrasivos e com a ferramenta de acabamento.

O primeiro objetivo terá como parâmetros de análise o sobremetal, o erro de cilindricidade inicial do furo, o qual foi previamente alargado com alargador de gume único, a velocidade periférica, a velocidade axial e o curso da ferramenta. Os efeitos desses parâmetros serão determinados através do erro de cilindricidade, da variação do diâmetro e dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z resultantes no furo.

As ferramentas utilizadas nesta análise são recobertas com grãos de diamante natural de tamanhos 150 μm , 50 μm e 30 μm , aproximadamente, denominadas D150, D50 e D30, respectivamente. O maior tamanho de grão será utilizado na ferramenta de desbaste e o menor na ferramenta de acabamento. Como amostras serão utilizadas peças da indústria óleo-hidráulica, na forma de carcaças de válvulas direcionais fabricadas em ferro fundido cinzento GG30.

Essas peças devem possuir furos com tolerâncias dimensionais e de forma de 1 μm e acabamento da superfície, medido através do parâmetro de rugosidade R_{max} , de no máximo 1,5 μm . Tais tolerâncias não podem ser obtidas com apenas uma ferramenta de brunimento, sendo, para isso, utilizadas as três ferramentas citadas anteriormente.

A partir dos resultados obtidos na determinação dos efeitos das variáveis de entrada sobre as características dimensionais e geométricas do furo brunido será realizada a otimização do processo de brunimento com ferramentas tipo bucha diamantada, segundo objetivo, visando atingir as tolerâncias de dimensão, de forma e de rugosidade do furo da peça em questão. A otimização será realizada através da definição das combinações de variáveis de entrada que resultam em furos com menores erros de forma, variação do diâmetro e rugosidade da superfície.

As duas melhores combinações de variáveis de entrada serão utilizadas na comprovação estatística do resultado do processo de brunimento otimizado, terceiro objetivo.

O quarto e último objetivo deste trabalho é avaliar a textura das superfícies brunidas. A avaliação será realizada através da verificação da ocorrência de defeitos superficiais e da formação de superfícies com características platafórmicas. Isto será realizado mediante análise visual, com auxílio da microscopia eletrônica de varredura e medição dos parâmetros de rugosidade da família R_k , de superfícies brunidas com diferentes velocidades periféricas, velocidades axiais e tamanhos de grãos de diamante. A integridade da superfície brunida será verificada, com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura, para peças usinadas com a ferramenta de acabamento e a ferramenta de desbaste sem o dressamento inicial dos grãos de diamante.

CAPÍTULO 3

ABRASIVOS

3.1 Usinagem com grãos abrasivos

Os grãos abrasivos, que devem proceder a penetração no material da peça e retirar cavacos, devem apresentar uma dureza superior à do material a ser usinado. Apenas as partes mais protuberantes do grão atuam durante o processo de usinagem, penetrando na superfície da peça (KÖNIG, 1989).

Tais protuberâncias são chamadas de gumes de corte do grão abrasivo e não possuem uma forma geométrica definida, como pode ser visto na figura 1.1, o que caracteriza o brunimento como um processo de usinagem com ferramenta com gume de geometria não-definida. Ao contrário da usinagem com ferramentas definidas, torneamento por exemplo, o grão abrasivo pode ter sua forma determinada apenas aproximadamente, com auxílio de métodos estatísticos, que fornecem a forma média dos gumes (KÖNIG, 1989).

A figura 3.1 fornece uma comparação entre o gume de corte de uma ferramenta de geometria definida e o gume de uma ferramenta de geometria não-definida.

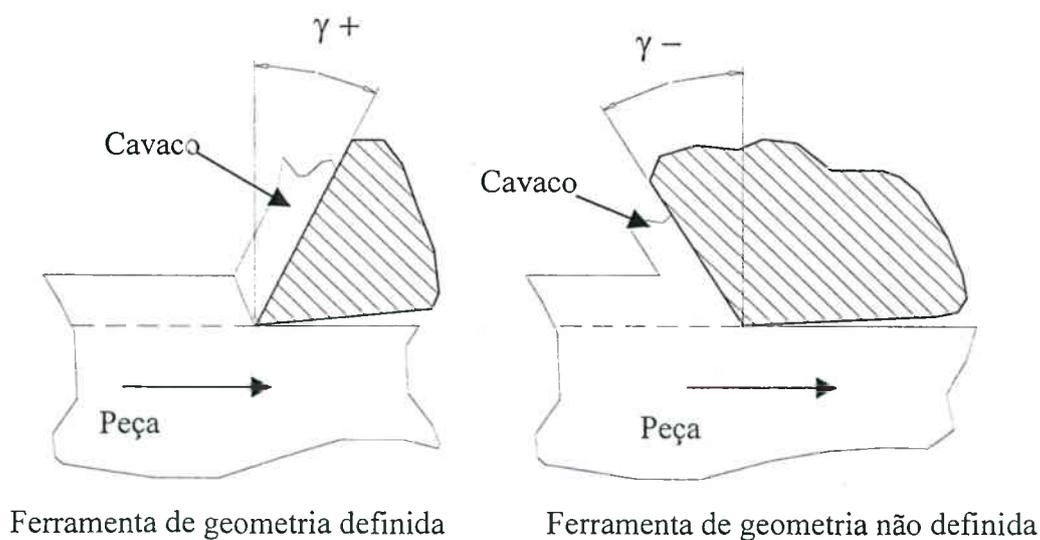


Figura 3.1 – Comparação entre os gumes de corte de ferramenta de geometria definida e ferramenta de geometria não-definida

O grão pode ser considerado como uma ferramenta monocortante, com geometria irregular e ângulo de saída de cavaco, γ , negativo, que penetra na peça produzindo um sulco, retirando um cavaco minúsculo e causando deformação plástica do material na região adjacente à retirada do cavaco (BRÜLÉ, 1992).

Além da geometria do gume, sua forma de penetração na peça é de suma importância, pois determinará a formação do cavaco, a textura e as deformações que a superfície da peça irá apresentar. Segundo KÖNIG, 1989, as formas de ação para a penetração de um gume estão representadas na figura 3.2.

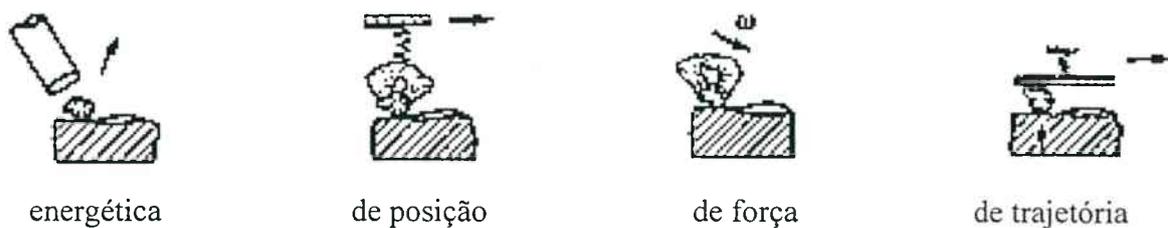


Figura 3.2 – Formas de ação para a penetração de um gume abrasivo (KÖNIG, 1989)

A penetração energética do gume do grão abrasivo é obtida através da incidência dos grãos, que não estão ligados entre si, sobre a superfície a ser trabalhada. Esta forma de ação pode ser verificada no processo de jateamento, em que a retirada de material ocorre principalmente devido à energia cinética de que o grão é provido.

Grãos abrasivos soltos são utilizados também na lapidação, onde são mantidos no espaço entre a ferramenta de lapidar e a superfície da peça a ser trabalhada. Um movimento relativo entre a superfície e a peça força os grãos abrasivos a rolar e a penetrarem na superfície da peça. A remoção de material se dá pela formação de pequenas crateras e por um processo de fadiga. A forma de penetração do gume neste caso é por limitação do espaço físico ou de posição.

Caso a ferramenta de lapidação seja pressionada contra a superfície da peça com uma grande força que impeça os grãos abrasivos de rolar, ao invés de crateras aparecerão pequenas linhas na superfície de trabalho. Dessa forma a penetração do gume é relacionada com a força.

Nos processos de brunimento e retificação, como os grãos abrasivos são mantidos em uma posição muito rígida e o movimento relativo entre a ferramenta e a peça é procedido em

uma linha prescrita, relaciona-se a penetração do gume a uma trajetória.

Durante o processo de brunimento os grãos abrasivos penetram na superfície da peça em uma trajetória que ocasiona estados transientes de corte e deformações plásticas na superfície usinada (KÖNIG, 1989 e BRÜLÉ, 1992), como demonstrado na figura 3.3.

Como no início da penetração do grão apenas uma pequena porção deste penetra na superfície da peça, não há condições para a formação do cavaco. O material escoou sob e para os lados dos grãos abrasivos, formando rebarbas (KÖNIG, 1989).

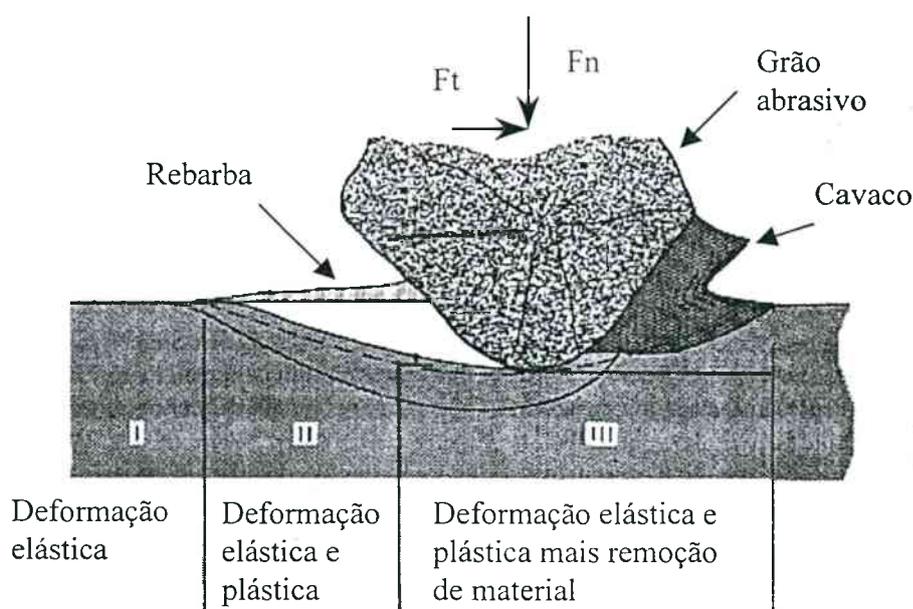


Figura 3.3 – Processo de formação de cavaco no brunimento (KÖNIG, 1989)

Como o ângulo de saída dos grãos abrasivos é variável com a profundidade de corte, somente quando o gume penetra o suficiente na peça para ocorrer o cisalhamento do material é que ocorre a formação do cavaco (KÖNIG, 1989 e BRÜLÉ, 1992).

A força de usinagem que atua sobre o gume durante a fase de ação do grão abrasivo pode ser subdividida em duas componentes, F_t , no sentido do corte e F_n , normal ao sentido de corte, como mostrado na figura 3.3 (KÖNIG, 1989).

Como na usinagem diversos grãos atuam ao mesmo tempo na retirada de cavaco, a força de usinagem da ferramenta como um todo é a soma vetorial das forças de usinagem que atuam

momentaneamente sobre os gumes isolados da parte da ferramenta que está atuando sobre a peça (KÖNIG, 1989).

Durante a fase em que a ação do grão abrasivo apenas escoava o material da peça, sem retirada de cavaco, a força normal com a qual o gume deve ser pressionado para dentro da superfície da peça é consideravelmente maior que a força tangencial, figura 3.3 (KÖNIG, 1989), levando a uma relação da força de usinagem relativamente alta. Quando ocorre a formação de cavaco, a força tangencial aumenta de forma que a relação da força de usinagem diminui.

BRÜLÉ, 1992, citando MICHELETTI, diz que como a força normal é muito maior que a força tangencial, o atrito entre o grão abrasivo e a superfície da peça é significativo, produzindo uma quantidade de calor maior do que o calor produzido pela força de corte propriamente dita. Em consequência, a usinagem com grãos abrasivos é uma usinagem que demanda muita energia.

A figura 3.4 mostra que a energia mecânica introduzida no processo é basicamente transformada em calor, em quatro regiões (KÖNIG, 1989). A maior parte da energia é transformada em calor devido ao atrito no flanco dos gumes, pela deformação plástica causada na superfície da peça e pelo atrito do cavaco na face do gume do grão.

A maior parte do calor formado flui para dentro da superfície da peça e lá provoca um aumento localizado de temperatura que, dependendo da sua ordem de grandeza e do tempo de atuação, pode provocar mudanças na estrutura cristalina do material, bem como fenômenos de oxidação superficial na peça (KÖNIG, 1989).

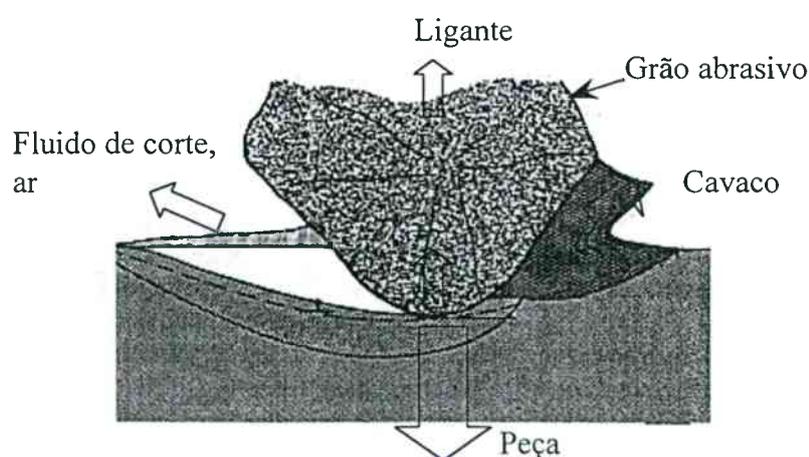


Figura 3.4 – Fluxo do calor gerado durante o processo de formação de cavaco (KÖNIG, 1989)

As influências térmicas também podem ser verificadas na ferramenta, que é afetada pelas elevadas temperaturas e pressões localizadas. É possível observar um desgaste térmico no

abrasivo e no ligante, como pode ser visto na figura 3.5 (KÖNIG, 1989).

O desgaste dos grãos abrasivos tem início nas camadas cristalinas próximas à camada superficial do grão abrasivo. Nessas camadas, as pressões e temperaturas elevadas levam a fenômenos de oxidação e difusão que resultam na redução da resistência abrasiva do material. Forma-se uma camada menos resistente à compressão que devido à ação mecânica subsequente é removida por abrasão e, com isto, novas camadas cristalinas do grão abrasivo estão sendo submetidas a este tipo de desgaste. (KÖNIG, 1989).

Outra causa de desgaste é a fissura do grão devido à fadiga da estrutura cristalina submetida a ações térmicas e mecânicas alternantes (KÖNIG, 1989). Essas fissuras podem propagar-se e levar à quebra de grandes partes do grão.

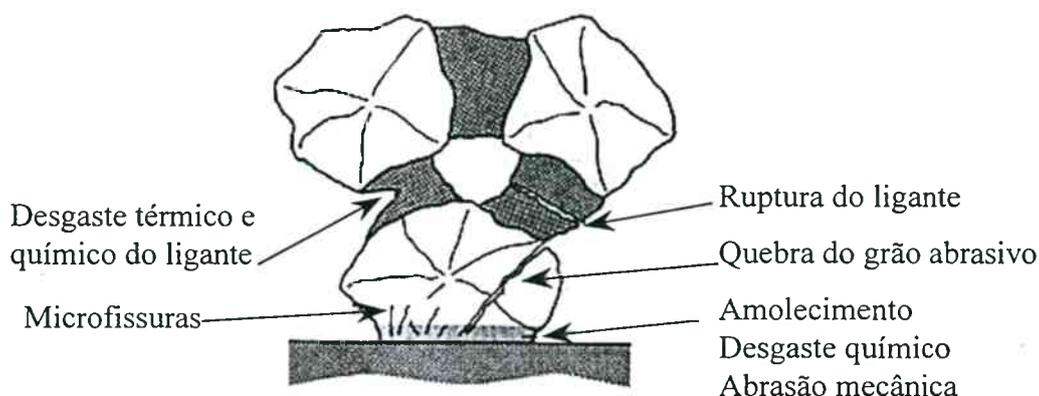


Figura 3.5 – Formas de desgaste no grão abrasivo e ligante (KÖNIG, 1989)

Além disto, o desgaste dos grãos abrasivos também é causa para o desgaste do ligante, pois o achatamento do gume do grão leva a um aumento da força de atrito, aumentando a força de corte e, com isto, ultrapassando o limite de resistência mecânica do ligante que rompe e libera o grão que nele estava ancorado (KÖNIG, 1989).

Outro mecanismo de arrancamento dos grãos é descrito por PERES, 1994, segundo GRIEB, onde os cavacos formados escoam sobre a superfície de saída do grão e atingem o ligante, onde mudam de direção e provocam um desgaste de cratera na camada do ligante, enfraquecendo-o.

3.2 Materiais abrasivos e ligantes

No brunimento a remoção de material também é realizada com ferramentas constituídas por grãos abrasivos, unidos entre si por um ligante, e espaços vazios (ELLIS, 1959).

O grão possui gumes de corte que devem ser friáveis o suficiente para fraturar e promover a sua auto-afiação e resistente o suficiente para suportar a pressão necessária para sua penetração na superfície da peça.

O ligante que segura os grãos, dando-lhes forma, deve ser forte o suficiente para prender o grão durante a sua ação de corte, mas não exageradamente duro para que com o desgaste do grão não venha a atritar com a superfície da peça, retardando o corte.

A porosidade, ou estrutura, depende da mistura do grão e ligante e o método de formação da pedra abrasiva. A porosidade afeta a ação de corte do grão, facilitando o armazenamento do cavaco e dessa forma minimizando a geração de calor.

3.2.1 Abrasivos

Os abrasivos utilizados podem ser naturais ou artificiais, sendo que dos naturais apenas o diamante ainda é usado. Os abrasivos sintéticos mais utilizados atualmente são o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC), o nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante. O CBN, o diamante sintético e o diamante natural são chamados de abrasivos superduros ou superabrasivos (BRÜLÉ, 1992).

A aplicação de diamante e nitreto de boro cúbico no brunimento tem permitido desenvolvimentos substanciais e iniciou a automação do processo (JUCHEM, 1986).

Existem duas formas mais utilizadas para a classificação do tamanho do grão abrasivo, FEPA e MESH. A classificação que especifica o tamanho de grão em MESH provém da norma norte-americana ANSI Standard B 74.12-1977 e representa o número de aberturas por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos no processo de seleção. A classificação da FEPA (Federação Européia dos Fabricantes de Abrasivos) especifica a abertura da malha da peneira em μm , sendo mais utilizada para grãos de diamante e CBN (STEMMER, 1992). A tabela 3.1 fornece um comparativo entre a classificação MESH e FEPA.

Uma qualidade importante dos abrasivos, do ponto de vista de sua utilização para a usinagem, é a dureza. Um método para a medição da dureza é o método Knoop, que consiste em comprimir uma ponta de diamante lapidada sobre o material em exame, com cargas entre 25 e

300 gramas, sendo a medida da diagonal da impressão em relação à carga imprimida considerada como o valor da dureza (STEMMER, 1992).

Tabela 3.1 – Comparativo entre as normas de classificação do tamanho dos grãos abrasivos (STEMMER, 1992, ENGIS, 1994)

	FEPA		MESH	DIN 848		FEPA		MESH	DIN 848
	DIAM	CBN				DIAM	CBN		
Fínissímo	M10		1800	D7	Médio	D251	B251	60/70	D220
	M16		1200	D15		D301	B301	50/60	D250
	M25		800	D15		D355	B355	45/50	D280
	M40		600	D30		D427	B427	40/50	D350
Muito fino	D46	B46	325/400	D45		D426	B426	40/45	D450
	D54	B54	270/325	D50		D501	B501	35/40	D500
	D64	B64	230/270	D55		D601	B601	30/35	D500
	D76	B76	200/230	D65		D602	B602	30/40	D500
	D91	B91	170/200	D70		D711	B711	25/30	D700
Fino	D107	B107	140/170	D90		D852	B852	20/30	D700
	D126	B126	120/140	D100	D851	B851	20/25	D700	
	D126	B126	120/140	D110	D1001	B1001	18/20	D900	
	D151	B151	100/120	D140	D1182	B1182	16/20	D1100	
	D181	B181	80/100	D150	D1181	B1181	16/18	D1100	
	D213	B213	70/80	D180					
D252	B252	60/80	D180						
					Grosso				

A tabela 3.2 compara a dureza e características químicas e físicas dos materiais abrasivos utilizados atualmente.

A seguir são apresentadas, em ordem crescente de dureza, algumas características dos principais materiais utilizados como abrasivos no brunimento. Exemplos dos grãos superabrasivos são fornecidos na figura 3.6,.

- Óxido de alumínio (Al_2O_3)

Extraído da bauxita, apresenta-se naturalmente como óxido de alumínio hidratado com quantidades variáveis de impurezas como sílica (SiO_2), Fe_2O_3 , TiO_2 e pequenas quantidades de outras impurezas (STEMMER, 1992).

A bauxita é fundida em forno a arco voltaico, com a adição de redutores (coque, cavacos de ferro) para a eliminação das impurezas, e cristalizada em blocos durante o resfriamento. Em

seguida, os blocos frios são britados, moídos e peneirados (STEMMER, 1992 e BRÜLÉ, 1992).

As características de dureza e tenacidade dos grãos abrasivos de óxido de silício dependem do processo de fundição, do tipo e porcentagem de impurezas, e do tamanho e tipo dos grãos, que são dependentes da forma como os blocos são britados (STEMMER, 1992).

Tabela 3.2 – Comparativo de propriedades físicas e químicas dos abrasivos
(CHRISTENSEN, 1993)

Parâmetros	Diamante	CBN	Carboneto de Silício	Oxido de Alumínio
Dureza Knoop (kg/mm^2)	8000	4500	2500	2100
Resistência relativa à abrasão (escala Mohs-Wooddell)	43	37	14	9
Resistência à compressão (kg/mm^2)	1065	720	58	300
Temperatura de oxidação ($^{\circ}\text{C}$)	± 650	± 1200	± 1200	± 1500
Reação química	Com ferro e oxigênio a partir de 900°C	Com água a partir de 800°C	Não reativo	Com ferro

O óxido de alumínio é utilizado para materiais metálicos em geral. Mais comum e muito usado é o óxido de alumínio marrom, cuja cor varia de acordo com o teor de TiO_3 , usado em aços comuns (STEMMER, 1992 e CARBURUNDUM, [199-]).

O óxido de alumínio com pureza superior a 99% é incolor, forma grãos abrasivos duros (K 2150), porém menos tenazes (mais friáveis), sendo utilizado quando é necessário manter gumes vivos. É chamado de óxido de alumínio branco e utilizado em aços temperados.

A introdução de óxido de cromo (Cr_2O_3) no óxido de alumínio branco produz grãos de coloração rosada, mantém a dureza (K 2150) e, ao mesmo tempo, aumenta a tenacidade. É empregado em aços de alta dureza e sensíveis ao calor.

O óxido de alumínio zirconado é obtido pela fundição conjunta de óxido de alumínio com 10 a 40% de óxido de zircônio (ZrO_2) e produz grãos com eficiência equivalente ao óxido de alumínio branco, porém mais duráveis (STEMMER, 1992). É utilizado em materiais ferrosos (CARBURUNDUM, [199-]).

- Carboneto de silício (SiC)

Este material é obtido pela fusão de areia de sílica com carvão mineral em forno elétrico

de resistência. O material obtido se divide em diversas camadas, dependendo da distância do núcleo do forno, que são moídas, submetidas a processos químicos de purificação, secadas e classificadas por tamanho de grão (STEMMER, 1992).

O SiC muito estável quimicamente, mesmo em temperaturas elevadas. As propriedades do carboneto de silício, como abrasivo, dependem do tipo e quantidade de impurezas encontradas em sua composição.

O carboneto de silício preto apresenta em sua composição 98% de SiC, e mais carbono, alumínio, ferro, cálcio, magnésio e silício. É utilizado na usinagem de ferro fundido, aço inoxidável, não-ferrosos (alumínio, latão e bronze) e não-metálicos (borracha, granito e mármore) (STEMMER, 1992 e CARBURUNDUM, [199-]).

A composição do carboneto de silício verde apresenta mais de 99% de SiC. Possui a mesma dureza do carboneto de silício preto, porém menor tenacidade sendo utilizado na usinagem de metal duro (carboneto de tungstênio) e alguns aços de altíssima dureza (STEMMER, 1992 e CARBURUNDUM, [199-]).

- Nitreto de boro cúbico (CBN)

Através da pirólise do cloreto amoníaco de boro é obtido o nitreto de boro hexagonal, um pó branco e mole que não apresenta nenhuma característica para aplicação como material abrasivo. Submetendo o nitreto de boro hexagonal a altas temperaturas e pressões é que se produz o nitreto de boro cúbico (KÖNIG, 1989).

O nitreto de boro cúbico é o mais duro abrasivo conhecido, depois do diamante. Sua vantagem em relação ao diamante é a resistência à temperatura, já que o diamante apresenta problemas de grafitização a partir de 650 °C, mantendo a estabilidade até 2000 °C (KÖNIG, 1989).

Na presença de água e oxigênio o CBN apresenta reação química em temperaturas perto de 800 °C . Quando os grãos de nitreto de boro cúbico são aquecidos a 1200 °C em ar seco, forma-se um revestimento de óxido de boro em sua superfície que age como uma camada protetora a essa reação química (KÖNIG, 1989).

O CBN é aplicado na usinagem de aço rápido, aço tratado a quente, aço temperado, ligas resistentes ao calor e ferro fundido (BRÜLÉ, 1992).

- Diamante

O diamante natural é composto por carbono, o qual foi submetido a pressões e temperaturas extremas durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais não podem ser empregados na fabricação de jóias devido a falhas e/ou impurezas (PERES, 1994).

Até a metade da década de 50 as ferramentas abrasivas eram fabricadas exclusivamente com diamantes naturais que tinham suas dimensões reduzidas, através de sucessivas operações de trituração e peneiramento, para que se pudesse obter os diversos tamanhos de grão. Com o início da produção do diamante sintético sua aplicação como ferramenta abrasiva expandiu grandemente (CHRISTENSEN, 1993).

A maior parte dos diamantes sintéticos é produzida através da transformação direta de carbono na forma amorfa para diamante através da ação de um catalisador. O carbono é submetido a grandes temperaturas (entre 2000 e 2800 °C) e altas pressões (10000 MPa) na presença de níquel, que atua como catalisador. A flexibilidade na escolha da combinação das condições de temperatura, pressão e catalisador permite o controle do tamanho dos grãos obtidos (KÖNIG, 1989, STEMMER, 1992).

A extrema dureza é sua propriedade mais relevante. Apesar de ser mais duro que o CBN, o diamante possui a indesejável característica de apresentar grafitização, quando submetido a uma pequena pressão, a partir de temperaturas de 900 °C. Na presença de oxigênio pode ocorrer oxidação a partir de 1400 °C (KÖNIG, 1989, STEMMER, 1992).

Como o brunimento é um processo que utiliza baixas velocidades de corte, não são geradas altas temperaturas, o que permite que os diamantes possam ser utilizados com sucesso (JUCHEM, 1986).

O diamante pode ser aplicado no brunimento de carboneto de tungstênio (metal duro), cerâmica, vidro, pedra, aço mole, aço temperado, ferro fundido, alumínio e materiais sinterizados (CHRISTENSEN, 1993 e JUCHEM, 1986).

3.2.2 Ligantes

Os ligantes tem a finalidade de manter o grão abrasivo aprisionado até que este tenha perdido sua capacidade de corte, devendo então liberar o grão desgastado de forma que grãos posicionados em camadas mais profundas, ainda afiados, possam entrar em ação (KÖNIG, 1989).

Os ligantes mais utilizados nas ferramentas de brunimento podem ser divididos em dois grupos:

- Ligantes orgânicos
 - Resinas sintéticas

São ligantes desenvolvidos a partir de uma ou de uma combinação de resinas aplicadas com ou sem materiais de enchimento. As mais utilizadas são as resinas fenólicas do tipo endurecível ou termofixa (STEMMER, 1992), sendo a pedra abrasiva obtida por um processo de prensagem a quente, a aproximadamente 200 °C (WINTER, 1997).

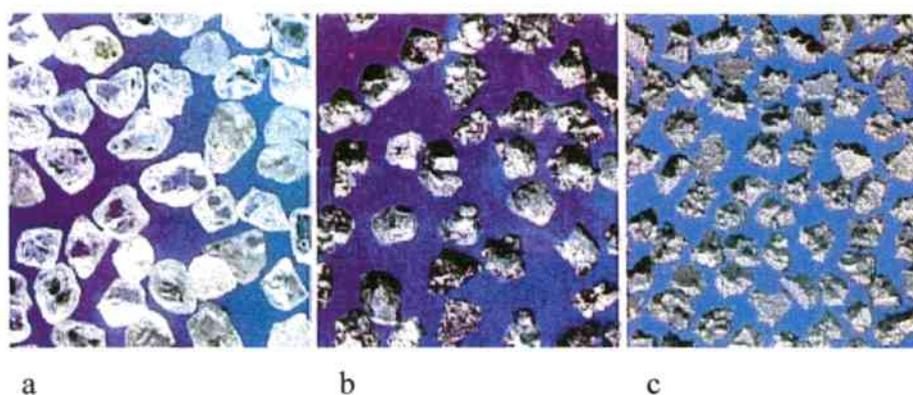


Figura 3.6 – Superabrasivos: a) diamante natural, b) diamante sintético, c) nitreto de boro cúbico (CHISTENSEN, 1993)

Os materiais de enchimento são usados para a obtenção de propriedades de resistência à flexão, estabilidade térmica e eliminação de vazios e bolhas. São utilizados pó de quartzo, hidróxido de cálcio e óxido de ferro (KÖNIG, 1989).

As resinas sintéticas produzem pedras abrasivas elásticas, mas são atacadas por soluções alcalinas com pH maior que 9 (STEMMER, 1992).

- Ligantes inorgânicos
 - Ligantes cerâmicos ou vitrificados

São constituídos de uma mistura de argila, caolim, quartzo, feldspato e fundentes (silicato de boro) que são moídos, peneirados e misturados em proporções que variam de acordo com as propriedades que se deseja obter, resistência e forma de ligação entre os grãos (KÖNIG, 1989).

Após a queima, em temperaturas entre 1000 e 1350 °C, o ligante assume um caráter vítreo ou porcelânico, conferindo às pedras abrasivas as seguintes propriedades (STEMMER, 1992):

- alta agressividade dos grãos resultante da estrutura bastante porosa;
- inelasticidade devido à dureza vítrea do ligante;
- insensibilidade ao calor e ao frio, porém sensível a choques térmicos;
- alta estabilidade frente a ácidos, água, óleo, gases, etc.

- Ligantes metálicos

Os ligantes metálicos são obtidos pela sinterização de pós nobres, de bronze ou de metal duro ou pela aplicação de uma camada galvânica sobre o abrasivo (KÖNIG, 1989). Sua utilização é mais freqüente com os superabrasivos.

As ligas metálicas são mais resistentes ao desgaste, apresentam maior vida útil, porém geram mais calor e maiores forças de corte. Os pós metálicos são misturados com os grãos abrasivos e colocados em moldes que são colocados em fornos, com atmosfera neutra e temperatura de 800 °C, para sinterização. A seguir é feita uma compactação em prensas hidráulicas (WINTER, 1997).

A aplicação da camada galvânica é realizada através de um processo eletrolítico que deposita uma camada de metal, geralmente níquel, sobre um corpo de metal, ficando os grãos fixados pelo níquel. A ancoragem dos grãos é bastante forte, podendo ficar o grão até 50 % exposto, conferindo grande agressividade e garantindo a existência de grandes espaços para remoção de cavacos (WINTER, 1997).

CAPÍTULO 4

OS DIVERSOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO

Existem diversas variantes do processo de brunimento, sendo que estes podem ser divididos em dois grupos principais: brunimento de curso curto e brunimento de curso longo (KÖNIG, 1989).

4.1 Brunimento de curso curto

O brunimento de curso curto é também chamado, muitas vezes, de “superfinishing” ou superacabamento. É caracterizado pela oscilação de alta frequência e baixa amplitude de uma pedra abrasiva em uma peça que possui movimento rotativo. O processo remove a camada superficial amorfa deixada pela operação anterior, expondo uma nova superfície no material base e simultaneamente melhorando a textura da superfície e a forma geométrica da peça (AUSCHNER, 1997).

Para uma peça cilíndrica, as irregularidades na geometria são, usualmente, na forma de lóbulos superpostos na circunferência. Uma peça com mais lóbulos no início da operação terá a melhor forma circular após o brunimento, como exemplifica a figura 4.1 (AUSCHNER, 1997).

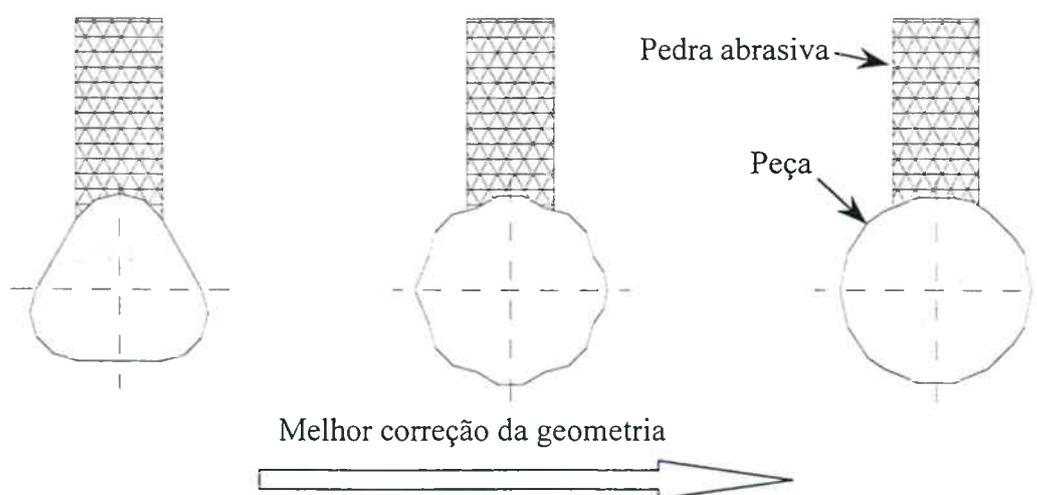


Figura 4.1 – Correção do erro de forma de acordo com a geometria inicial da peça (AUSCHNER, 1997)

Uma das grandes vantagens do uso do superacabamento é que as pedras utilizadas promovem a sua própria afiação durante a usinagem, isto é, há uma renovação de grãos afiados na superfície da pedra abrasiva. Esta característica pode ser explicada em três etapas, de acordo com a figura 4.2 (AUSCHNER, 1997 e HALE, 1997).

1. Contato inicial – a superfície lisa da pedra abrasiva toca a superfície rugosa da peça. Os grãos cegos são fraturados ou arrancados da matriz e uma nova superfície de corte, agressiva, é produzida. Há uma alta taxa de remoção de material da peça durante esta fase, sendo os pontos mais altos da superfície removidos.
2. Remoção de material – a superfície agressiva da pedra abrasiva continua a cortar e desgastar. Como o acabamento da peça melhora, a superfície abrasiva também se torna mais fina. Ocorre a remoção das irregularidades remanescentes das operações anteriores, como as marcas de retificação e torneamento, e da camada amorfa. A geometria da peça está sendo melhorada com a remoção dos pontos altos da peça.
3. Acabamento final – a superfície da peça e do abrasivo estão lisas. A capacidade de corte da pedra abrasiva é mínima e o acabamento final é alcançado.

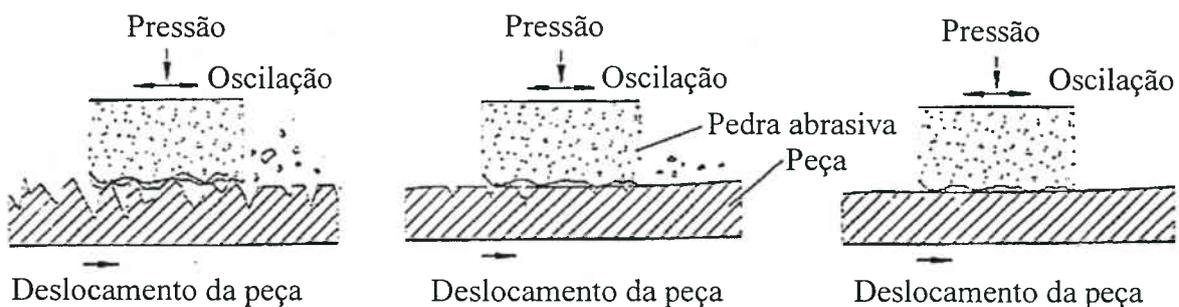


Figura 4.2 – Processo de auto afiação da pedra abrasiva durante o processo (HALE, 1997)

Uma importante característica que deve ser observada é que o processo de brunimento de curso curto é dependente das características da superfície da peça proveniente da operação anterior. Peças com uma rugosidade alta mas com pouco material a ser removido podem não ter todas as irregularidades removidas e manter a tolerância dimensional ao mesmo tempo. Por outro lado, peças muito lisas podem não fornecer uma boa superfície para que a pedra abrasiva seja dressada na fase de contato inicial (AUSCHNER, 1997).

Diferentes alturas de pico a vale na rugosidade inicial da superfície da peça afetarão o processo de superacabamento, necessitando de diferentes remoções de material e tipos de pedras

abrasivas. A quantidade mínima necessária de material a ser removido pode ser dada pela equação (AUSCHNER, 1997):

$$MR_{\min} = 2 \times R_y \quad (4.1)$$

onde: MR_{\min} = quantidade mínima de material a ser removido

R_y = altura máxima de pico a vale da operação anterior

O movimento entre a ferramenta e a peça no brunimento de curso curto pode ser decomposto em três componentes de velocidade ortogonais, como mostrado na figura 4.3 (KÖNIG, 1989):

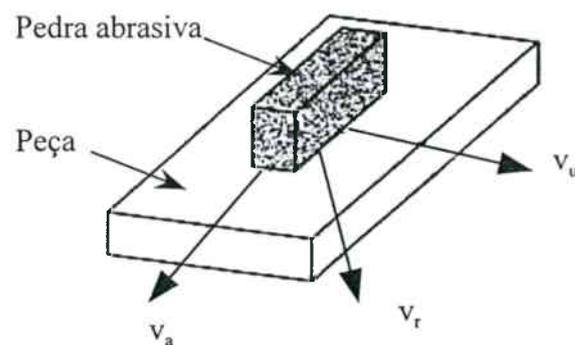


Figura 4.3 – Componentes da velocidade no brunimento de curso curto (KÖNIG, 1989)

- velocidade axial (v_a)
- velocidade tangencial (v_u)
- velocidade de posicionamento (v_r)

As velocidades axial e tangencial são paralelas à superfície da peça enquanto que a velocidade de posicionamento é normal à superfície da peça.

A velocidade resultante no brunimento de curso curto é dada por:

$$v_{res} = \sqrt{v_a^2 + v_u^2 + v_r^2} \quad (4.2)$$

Como v_r , condicionada pela velocidade de retirada de material, é muito pequena em relação às outras duas componentes, a velocidade resultante pode ser simplificada para:

$$v_{res} = \sqrt{v_a^2 + v_u^2} \quad (4.3)$$

Para a operação de superacabamento com pedra oscilante, mostrada na figura 4.4 (KÖNIG, 1989 e AUSCHNER, 1997), os parâmetros que afetam a taxa de remoção de material e o acabamento superficial alcançado durante o processo são:

- v_u : velocidade rotacional da peça;
- h : amplitude da oscilação;
- f : frequência da oscilação;
- P : pressão específica da pedra abrasiva;
- t : tempo de contato;
- L e W : dimensões da pedra abrasiva;
- tipo de pedra abrasiva: material abrasivo, tamanho de grão e dureza da pedra.

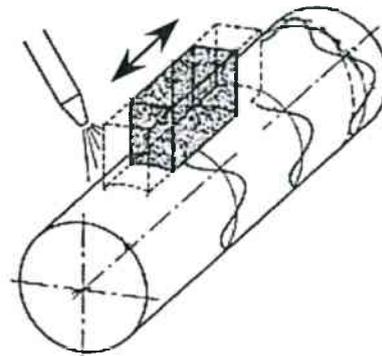


Figura 4.4 – Movimentos mecânicos no superacabamento (KÖNIG, 1989)

Quanto à velocidade resultante, sua componente velocidade rotacional, v_u , pode ser considerada constante, enquanto que sua componente velocidade axial, v_a , é resultante de um movimento oscilatório, que em geral tem o comportamento de uma onda senoidal (KÖNIG, 1989).

Assim:

$$v_a = h \cdot \pi \cdot f \cdot \cos \omega t \quad (4.4)$$

e v_{res} fica:

$$v_{res} = \sqrt{(h \cdot \pi \cdot f \cdot \cos \omega t)^2 + v_u^2} \quad (4.5)$$

Com o valor máximo:

$$v_{res \max} = \sqrt{(h \cdot \pi \cdot f)^2 + v_u^2} \quad (4.6)$$

E valor mínimo:

$$V_{res\ min} = V_u \quad (4.7)$$

As pedras abrasivas consistem de um abrasivo (óxido de alumínio, carboneto de silício e em algumas aplicações especiais CBN), ligados em uma matriz vitrificada. Os tamanhos de grão variam de 120 até 1200 μm , classificação FEPA (AUSCHNER, 1997).

O brunimento de curso curto pode ser dividido em várias variantes:

- Brunimento de curso curto entre pontas ou de mergulho

Nesta variante a peça a ser brunida é fixada entre pontas e a pedra de brunir é pressionada contra a peça e desloca-se em seu sentido longitudinal, com movimentos oscilatórios (PERES, 1994 e AUSCHNER, 1997), figura 4.5.

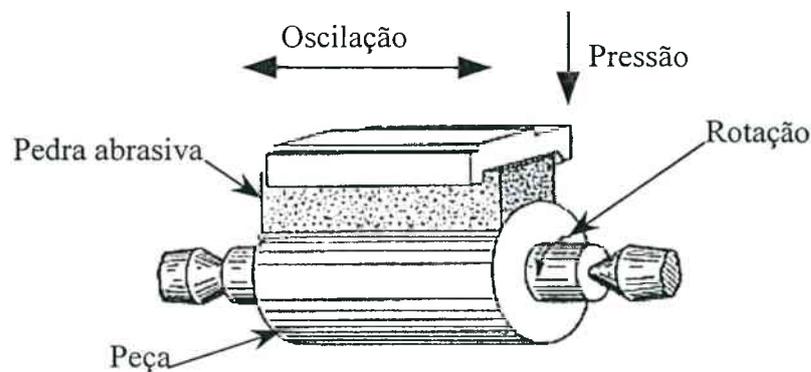


Figura 4.5 – Brunimento de curso curto entre pontas (WICK et. al., 1985)

Segundo KÖNIG, 1989, pode ser aplicado na usinagem de virabrequins, eixos de rotor para motores elétricos, rolos de laminação, etc. Como vantagens pode-se citar a possibilidade de brunimento de sangramento, ser executado em um torno convencional, para a usinagem de grandes peças. As desvantagens são a necessidade de centragem da peça e a não-aplicação à produção em série devido ao tempo secundário muito alto.

Uma aplicação especializada para o brunimento de curso curto entre centros é o superacabamento de cames, através do uso de um suporte especial para as pedras abrasivas que seguem o perfil do came. O suporte da pedra mantém a mesma área de contato entre a peça e a pedra abrasiva em toda a usinagem. Dessa forma se mantém uma taxa de remoção de material constante e a distorção do perfil do came é eliminada (AUSCHNER, 1997).

- Brunimento “centerless” de passagem

O brunimento “centerless” de passagem, como descreve AUSCHNER, 1997, geralmente é realizado após uma operação de retificação “centerless”. Como ilustrado na figura 4.6 (PERES, 1994, AUSCHNER, 1997 e HALE, 1997), a peça passa entre dois rolos, ambos rotacionando na mesma direção, os quais promovem o avanço e a rotação da peça.

O trajetória do transporte axial da peça descreve uma linha reta porque os rolos de avanço possuem forma hiperbólica e estão inclinado em relação à horizontal ($\pm 2^\circ$). A inclinação determina a velocidade de passagem da peça através dos rolos.

As pedras abrasivas pressionam a peça entre os rolos com uma força “P”, de maneira que seja garantida fricção suficiente entre a peça e os rolos, permitindo que a peça gire, avance ao longo dos rolos e seja usinada.

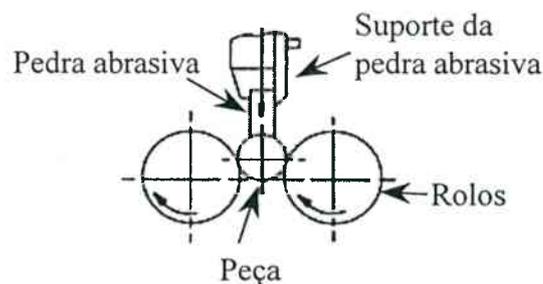


Figura 4.6 – Brunimento de curso curto “centerless” (WICK et al., 1985)

As pedras abrasivas utilizadas possuem diferentes tamanhos de grão, sendo as primeiras pedras de grão maior, realizando o desbaste, e as pedras finais de grão menor, produzindo a qualidade superficial desejada. Fluido de corte é alimentado continuamente para retirada dos cavacos produzidos durante a usinagem.

As oscilações na direção axial geralmente se situam na faixa de 1 a 6 mm, e a frequência entre 26 e 50 Hz. O tempo do ciclo, que depende da velocidade de passagem, geralmente entre 4 e 6 m/min.

De acordo com KÖNIG, 1989, pode ser utilizada na usinagem de eixos, pinos, guias, bielas, roletes de rolamento, eixos de rolamento, etc. Como vantagens temos a possibilidade de automação do processo, garantia da qualidade homogênea da superfície da peça e tempos secundários pequenos. Como desvantagem cita-se a não-aplicabilidade para a usinagem de apenas uma peça.

- Brunimento “centerless” de mergulho

Como no brunimento “centerless” de passagem, nesta variante do brunimento de curso curto a peça também é pressionada contra os rolos, que lhe imprimem o movimento de rotação, pela pressão das pedras abrasivas. As pedras de brunimento também possuem o movimento oscilatório. A diferença se dá pela ausência do formato de hipérbole dos rolos de apoio, sendo que dessa forma não existe o movimento de avanço da peça (PERES, 1994).

Como área de aplicação do brunimento “centerless” de mergulho KÖNIG, 1989, relaciona a usinagem de eixos de rotores, eixos em geral, comandos de válvulas, etc. As vantagens são o pequeno tempo secundário, a possibilidade de automação e a não-necessidade de centragem da peça. Como desvantagens pode-se citar a necessidade de aplicação de encostos, a utilização de apenas uma pedra abrasiva e a possibilidade de transmissão de erros do cilindro de apoio para a peça.

- Brunimento “centerless” manual

Neste tipo de brunimento é utilizado um dispositivo como o da figura 4.7 (PAULL et al., 1967 e ELLIS, 1959).

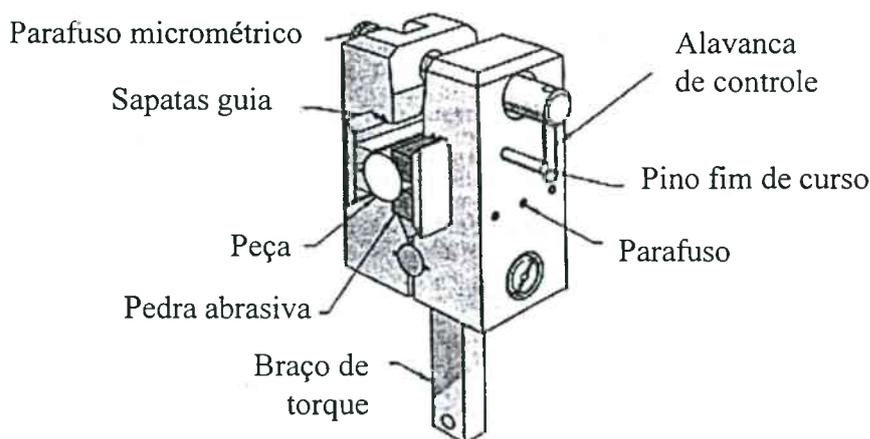


Figura 4.7 – Brunimento manual “centerless” (PAULL et. al., 1967)

O operador prende a peça, que é fixada em um eixo rotativo, entre os lados da ferramenta, que é deslocada em relação ao eixo da peça. O avanço da pedra abrasiva e a taxa de corte são controlados pela pressão aplicada na alavanca de controle, que avançará até a distância ajustada. O tamanho é controlado automaticamente pelo ajuste micrométrico do avanço da pedra,

mantendo a alavanca de controle contra o pino de fim de curso. O único ajuste necessário durante a operação de brunimento é um leve avanço na pedra para compensar o seu desgaste.

Uma volta da alavanca de controle e as pedras soltarão a peça, permitindo assim uma rápida troca de peças. O braço de torque pode ser usado para eliminar a tendência da ferramenta girar, sendo apoiado em uma barra guia montada na máquina.

- Brunimento de perfis

O brunimento de perfis é usado na usinagem de superfícies internas e externas de peças com geometrias especiais. Característica importante deste processo é que a ferramenta possui a forma a ser reproduzida na peça usinada (PERES, 1994).

Um exemplo clássico são as superfícies dos canais de rolamentos de esferas (KÖNIG, 1989 e PAULL et al., 1967), mostrados na figura 4.8.

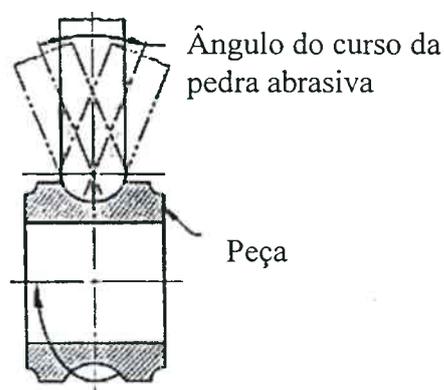


Figura 4.8 – Brunimento de perfis (PAULL et. al., 1967)

São utilizadas máquinas especiais que rotacionam a peça e oscilam a pedra abrasiva simultaneamente.

Segundo KÖNIG, 1989, este processo tem como vantagem a possibilidade de automação para a produção de um grande número de peças, enquanto que a principal desvantagem é que erros no perfil não são corrigidos.

- Brunimento de superfícies planas e esféricas

Esta variante de brunimento utiliza uma pedra abrasiva em forma de copo para usinar a peça (AUSCHNER, 1997). Como para os demais processos, são necessárias duas componentes

de movimento, rotação e avanço, ou mesmo dois movimentos de rotação (PERES, 1994).

O brunimento de superfícies planas e esféricas pode ser visualizado na figura 4.9 (WICK et al., 1985 e HALE, 1997).

O processo possui as mesmas características do brunimento cilíndrico, gerando muito pouco calor e não alterando a estrutura básica do material. Entretanto este processo é menos dependente das operações de usinagem anteriores do que no brunimento cilíndrico.

A vantagem deste processo em relação à lapidação, segundo KÖNIG, 1989, é a grande taxa de remoção e a desvantagem a aplicabilidade somente em casos especiais. Como exemplo de aplicação encontramos a usinagem de superfícies de guias de máquinas-ferramentas, réguas e superfícies de vedação.

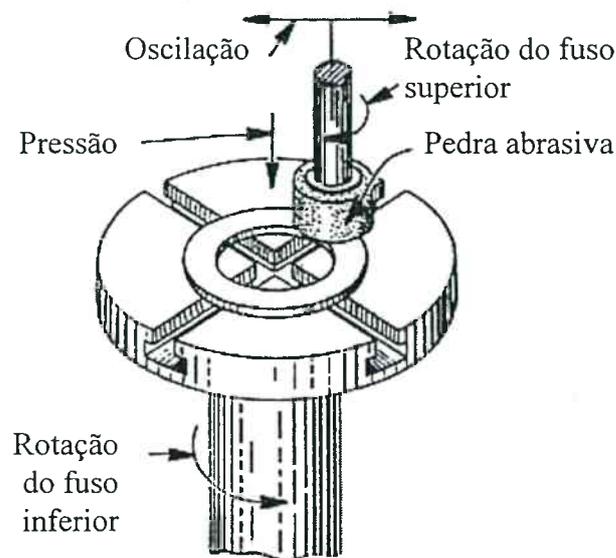


Figura 4.9 – Brunimento plano (WICK et. al., 1985)

4.2 Brunimento de curso longo

O brunimento de curso longo é um processo rápido e preciso, utilizado na usinagem de furos, nos quais são empregados ferramentas cilíndricas.

Além de conferir precisão à forma e dimensão usinada tem, também, o importante propósito de gerar uma topografia própria. Algumas das principais áreas de aplicação do processo, segundo KÖNIG, 1989, são: camisas de cilindros, tambores de freio, cilindros de freio, cilindros hidráulicos e válvulas hidráulicas.

Como vantagens KÖNIG, 1989, cita o curto tempo de fabricação, a alta taxa de remoção,

possibilidade de correção de erros de forma e de medida. A principal desvantagem do processo é a impossibilidade de corrigir erros de posicionamento.

O brunimento de curso longo pode ser dividido em dois grupos:

- Brunimento convencional;
- Brunimento de passe único.

A diferença básica entre estas duas variantes do processo são os movimentos mecânicos realizados pela ferramenta, os quais podem ser vistos na figura 1.2 (MARVIN, 1998) e a topografia das superfícies geradas, figura 4.10 (NAGEL, 1994).



Figura 4.10 – Textura da superfície gerada pelo brunimento de curso longo de passe único, esquerda e convencional, direita (NAGEL, 1994)

No brunimento convencional três movimentos mecânicos atuam ao mesmo tempo, rotação, avanço oscilante e expansão da ferramenta.

No brunimento de passe único, entretanto, a ferramenta é ajustada para retirar certa quantidade de material e passa pela peça apenas uma vez. Se uma quantidade maior de material necessita ser retirada o diâmetro da ferramenta deve ser ajustado novamente ou várias ferramentas com diâmetros diferentes devem ser utilizadas em seqüência.

As ferramentas de brunimento de passe único utilizam como abrasivo, principalmente, os chamados superabrasivos, diamante e CBN, e ligante metálico. Os superabrasivos são utilizados visando eliminar a necessidade do ajuste freqüente do diâmetro da ferramenta para compensar o seu desgaste, enquanto que o ligante metálico tem a função de suportar a solicitação de retirar o material em apenas uma passada.

A característica de não necessitar expandir e contrair as superfícies de corte durante cada ciclo, combinada com o pequeno desgaste dos superabrasivos, permite ao processo de passe

único manter o máximo de controle do tamanho do furo (MARVIN, 1997).

Como o brunimento de curso longo de passe único é o objeto deste trabalho, suas características serão detalhadas no capítulo seguinte.

4.3 Comparação entre o brunimento e outros processos

Para peças com formas particulares, o brunimento é um meio prático de atender à precisão necessária. Um exemplo típico são furos cujo comprimento é muito grande em relação ao diâmetro. Para o acabamento destes furos, a retificação é excluída devido ao excessivo comprimento do fuso e a lapidação é excessivamente demorada e cara (PAULL et al., 1967).

Quando o diâmetro interno se aproxima ou excede o comprimento do furo, resultados aceitáveis podem ser produzidos tanto pela retificação quanto pelo brunimento. A escolha entre os dois processos depende então dos custos, da disponibilidade de equipamento e, algumas vezes, da política estabelecida na fábrica (PAULL et al., 1967).

JUCHEM, 1986, faz uma comparação, através de um exemplo prático, entre o brunimento e a retificação. Para isto ele utiliza a taxa específica de remoção de material por mm^2 de área da ferramenta de brunir, Z'' :

$$Z'' = \frac{\Delta v}{t \cdot A} \quad \text{mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}^2 \quad (4.8)$$

onde Δv é o volume de material removido da peça em mm^3 , t é o tempo de usinagem em segundos e A é a área de abrasivos na ferramenta em mm^2 .

A figura 4.11 (JUCHEM, 1986) indica a taxa específica de remoção de material obtida com máquinas modernas e ferramentas otimizadas no brunimento de aço Cr temperado. Da figura observa-se que uma taxa por área de $Z'' = 0,02 \text{ mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}^2$ pode ser alcançada com o uso de brunidores com pedras de CBN.

Para a retificação de uma peça com um furo de 120 mm de diâmetro, seria empregado, tipicamente, um rebolo de CBN com 80 mm de diâmetro e 25 mm de largura. Usando parâmetros de corte severos para retificação interna e retirando 0,03 mm de material no diâmetro, é alcançada uma taxa de remoção:

$$Z = 94 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Se a taxa de remoção de material é relacionada a 1 mm de largura do rebolo, pode-se obter a taxa específica de remoção de material:

$$Z' = 4,52 \text{ mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$$

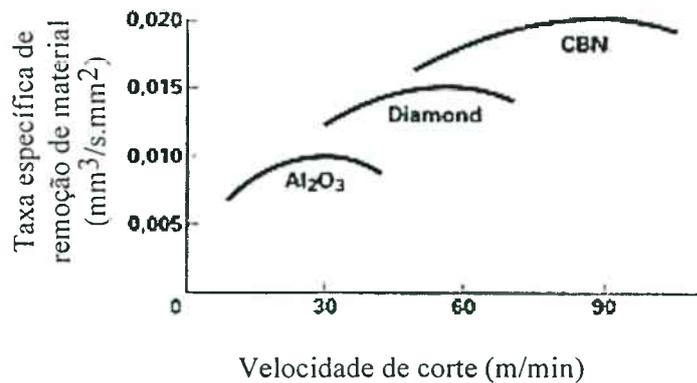


Figura 4.11 – Taxa específica de remoção de material em aço temperado com diversos tipos de abrasivos (JUCHEM, 1986)

Esta é uma taxa muito alta para retificação interna, normalmente com valores em volta de 2 – 3 mm³/s.mm. Através do cálculo da taxa específica de remoção de material por área de rebolo, $Z'' = 0,018 \text{ mm}^3/\text{s.mm}^2$, verifica-se que este valor é similar ou levemente menor que o apresentado para o brunimento com CBN.

KOMANDURI et al., 1997, afirmam que devido ao número de grãos envolvidos no processo de usinagem ser muito alto são alcançadas altas taxas de remoção de material através da geração de cavacos muito pequenos proporcionando, por isto, uma mínima geração de calor.

CAPÍTULO 5

GRANDEZAS DE ENTRADA E RESULTADOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO DE CURSO LONGO

Para avaliar um processo e efetuar melhorias, é importante conhecer a máquina e os parâmetros de operação que fornecem um desempenho específico. O resultado do trabalho obtido pelo processo de brunimento é determinado por dois grupos de grandeza de entrada, representados na figura 5.1 (JUCHEM, 1986 e KÖNIG, 1989).

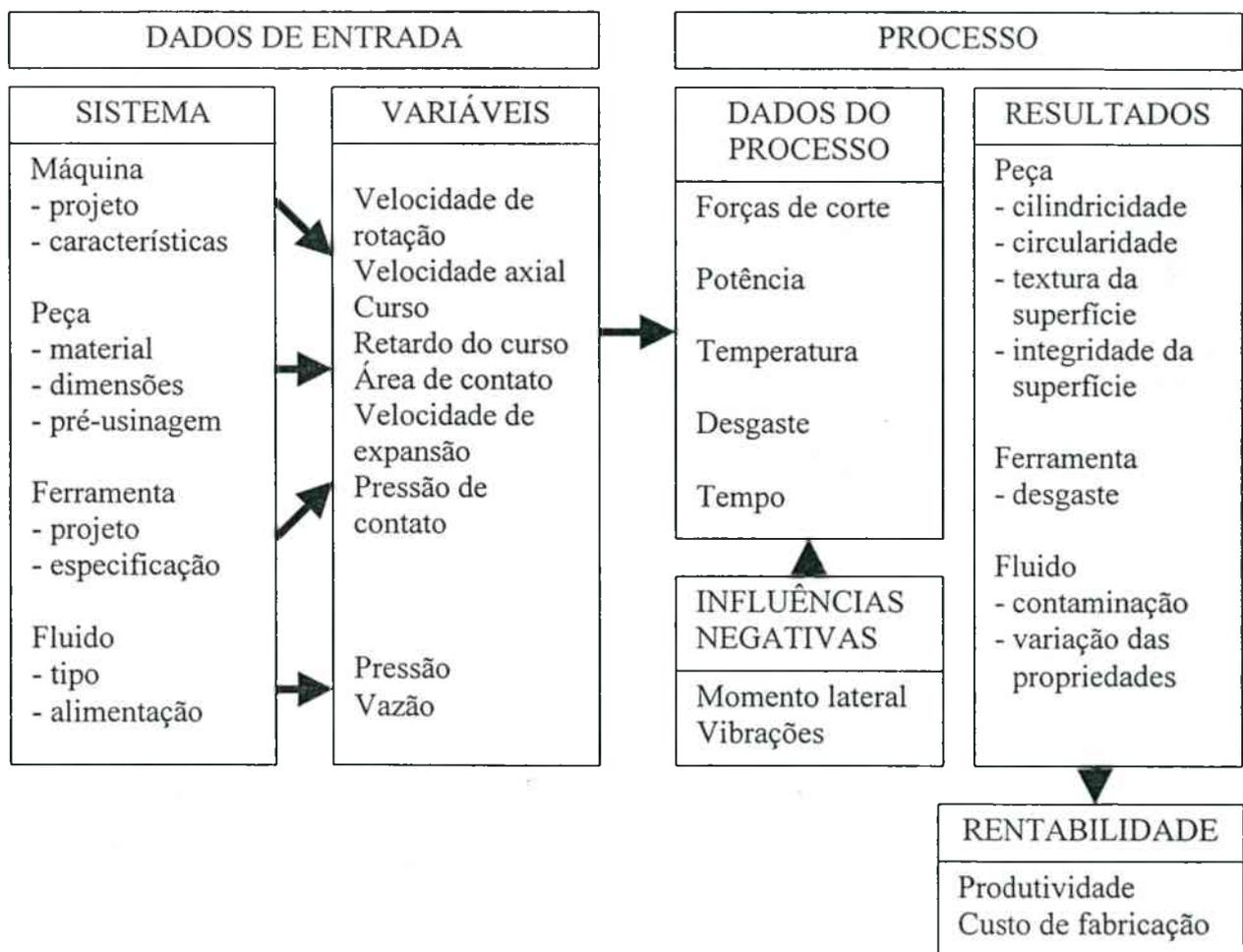


Figura 5.1 – Características do processo de brunimento (KÖNIG, 1989)

O primeiro grupo, sistema de trabalho, é fixo e contém as grandezas de entrada estáticas para o processo, sendo determinado pela máquina, a peça, a ferramenta e equipamentos

auxiliares. O segundo grupo representa os parâmetros disponíveis dentro do sistema, que determinam a mecânica do processo de usinagem. O estudo dos parâmetros variáveis que influenciam os dados do processo e os resultados do brunimento dão subsídios para a otimização do brunimento (JUCHEM, 1986 e KÖNIG, 1989).

A cinemática resulta da superposição de dois movimentos, o movimento axial, composto da velocidade axial da ferramenta, do curso e do retardo do curso e do movimento de rotação, resultante da velocidade de rotação da ferramenta. A mecânica do processo para uma determinada cinemática é determinada pela pressão de contato entre peça e ferramenta e pela pressão de alimentação e vazão do fluido de corte (KÖNIG, 1989).

A totalidade das grandezas de entrada determina os dados do processo e o resultado do trabalho. A influência das grandezas de entrada serão descritas a seguir com os itens distribuídos de maneira a facilitar o entendimento do processo de brunimento como um todo.

Apesar das grandezas de entrada descritas terem influência sobre todas as variantes do processo de brunimento, o estudo destas será voltado para o brunimento de curso longo.

5.1 Resultados do brunimento sobre as características da peça

Durante o estudo da influência das variáveis de entrada sobre o resultado do trabalho no brunimento de curso longo será descrito como as variáveis afetam a precisão geométrica, de forma e a qualidade da superfície produzida. Para que seja possível um melhor entendimento do significado destas variações, é descrito a seguir o significado dos parâmetros utilizados para qualificar e quantificar o resultado do trabalho de brunimento.

Pode ser encontrado com facilidade na literatura que o brunimento é um processo de fabricação empregado para a melhoria da forma, da medida e da superfície (KÖNIG, 1989, JUCHEM, 1986, PAULL et al., 1967 e ELLIS, 1959).

Em relação ao brunimento de passe único são descritas capacidades de serem alcançadas precisão dimensional e erros de forma menores que $2 \mu\text{m}$ e acabamentos superficiais melhores que $0,1 \mu\text{m R}_a$ (MARVIN, 1998, MARVIN, 1997, HAASIS, 1993, NAGEL, 1994, MILLER, 1996, ARUNACHALAM, 1997).

Precisão dimensional menor que $2 \mu\text{m}$ significa que a variação na medida do diâmetro do furo produzido não ultrapassa este valor, assim como é possível obter vários furos em diferentes peças com uma variação na medida do diâmetro dentro desta faixa.

Geometria ou erro de forma são avaliados através dos parâmetros cilíndricidade e circularidade, enquanto que a textura da superfície pode ser avaliada através de uma série de

parâmetros normalizados que medem a rugosidade.

Circularidade, figura 5.2, é definida como a zona de tolerância limitada, no plano de medição perpendicular ao eixo, por dois círculos concêntricos separados por uma distância t (CERTI, 1994).

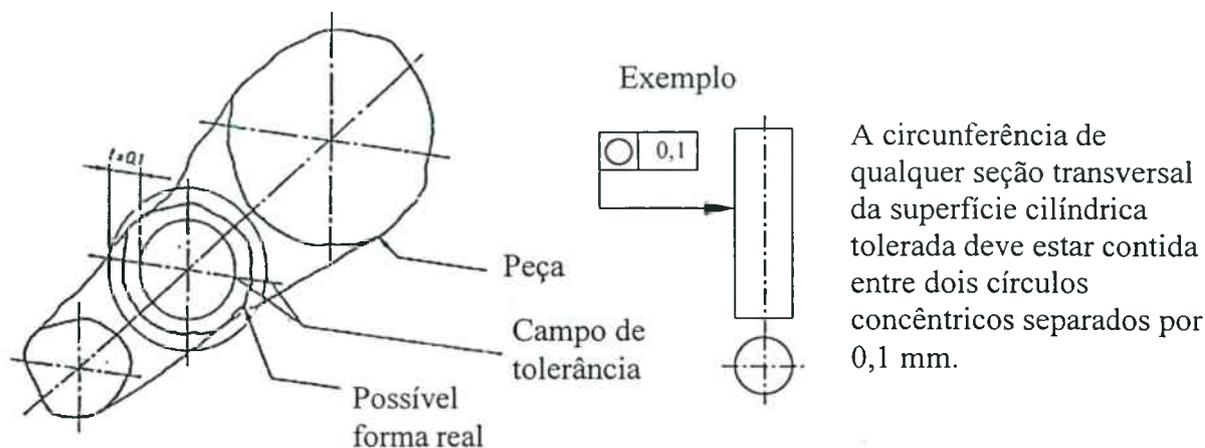


Figura 5.2 – Definição de circularidade (CERTI, 1994)

Cilindricidade, figura 5.3, é definida como a zona de tolerância limitada por dois cilindros coaxiais separados a uma distância t (CERTI, 1994).

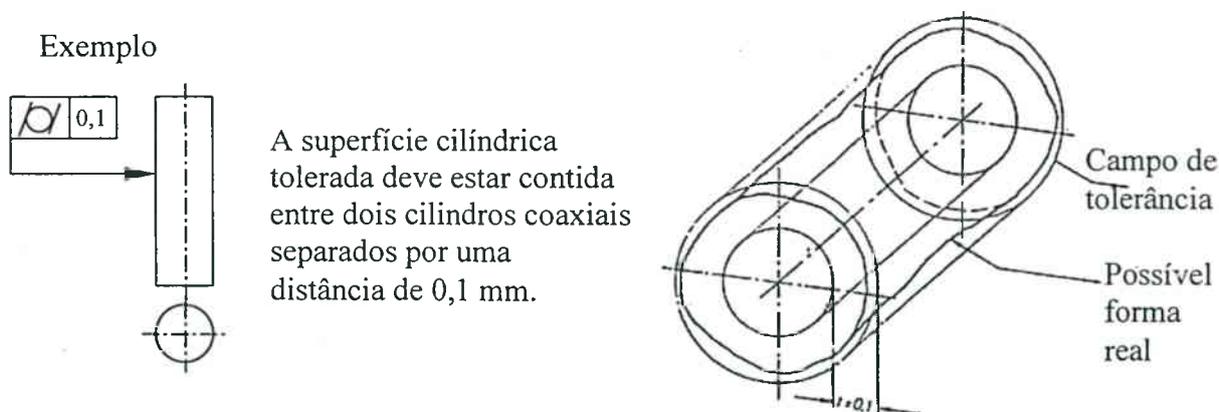


Figura 5.3 – Definição de cilindridade (CERTI, 1994)

A figura 5.4 representa a comparação das dimensões entre o diâmetro de objetos conhecidos e o diâmetro de um objeto de $1 \mu\text{m}$. Pode-se visualizar que um objeto de diâmetro de $1 \mu\text{m}$ é aproximadamente 60 vezes menor que a espessura do fio do cabelo humano. Segundo

MARVIN, 1994, este tipo de precisão, algumas vezes difícil de medir, e frequentemente difícil de imaginar, pode ser produzido em uma linha de fabricação sob as condições corretas.

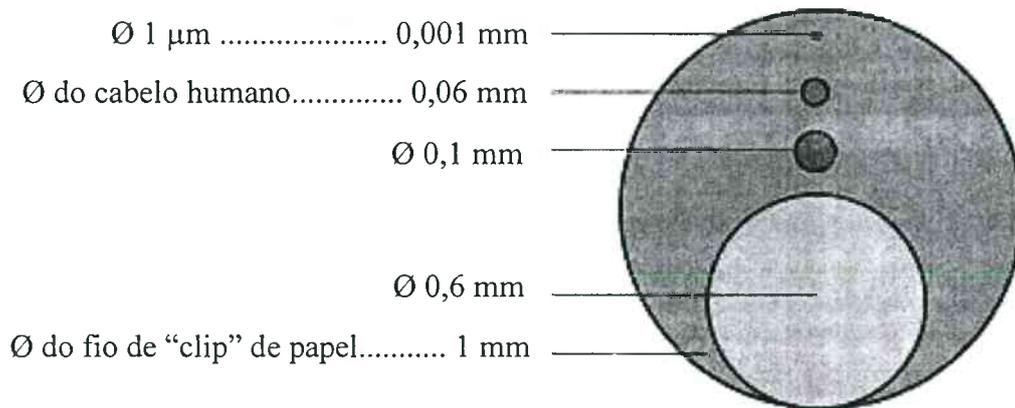


Figura 5.4 – Comparação entre dimensões

A textura da superfície é qualificada e quantificada através de parâmetros normalizados que tentam descrever a superfície. Os parâmetros mais utilizados para a avaliação de superfícies brunidas são:

- R_a - Desvio médio aritmético de rugosidade ou valor médio de rugosidade
- R_y - Altura máxima do perfil
- R_z - Profundidade média de rugosidade
- R_{max} - Profundidade máxima individual de rugosidade
- Parâmetros R_k , descritos na norma DIN 4776

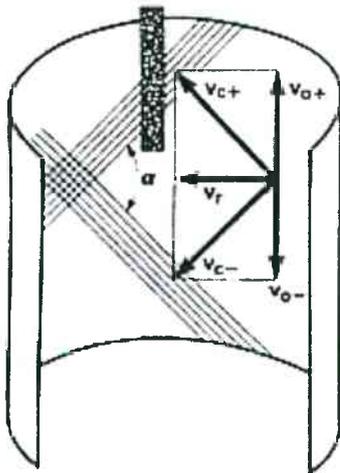
A avaliação da textura e da integridade de superfícies brunidas serão abordados novamente no capítulo 7. A definição dos parâmetros citados acima pode ser vista no anexo 1.

5.2 Influências dos parâmetros variáveis sobre o resultado do brunimento

5.2.1 Influências da velocidade de corte sobre o resultado do brunimento

No brunimento a velocidade de corte, v_c , é formada por duas componentes, a velocidade de rotação, ou periférica, v_r e a velocidade axial, ou de oscilação v_o .

No brunimento convencional, como já mencionado no capítulo anterior, dependendo da direção da retirada de material, a velocidade de corte muda sua direção, produzindo, dessa forma, uma superfície típica do brunimento com estrias cruzadas com uma inclinação α , figura 5.5 (JUCHEM, 1986).



v_r – velocidade rotacional ou periférica

v_o – velocidade de oscilação

v_c – velocidade de corte resultante

$$v_c = \sqrt{v_r^2 + v_o^2} \quad (5.1)$$

$$\alpha = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{v_o}{v_r} \quad (5.2)$$

Figura 5.5 – Cinemática do processo de brunimento convencional (JUCHEM, 1989)

No brunimento de passe único, como o material é retirado em apenas um movimento de corte, na entrada da ferramenta na peça, as estrias cruzadas não são claramente visíveis. No retorno da ferramenta, como não ocorre retirada de material, a ferramenta apenas é guiada pelo furo formando estrias profundas.

De forma diferente que no brunimento de curso curto, o movimento axial não é decorrente de um movimento harmônico. A velocidade axial é praticamente constante ao longo de todo curso de trabalho, e apenas se reduz a zero na proximidade do ponto morto inferior e do ponto morto superior (KÖNIG, 1989).

O aumento da velocidade de corte influencia diretamente a taxa de brunimento, para uma certa pressão de contato, tornando possível uma maior taxa de remoção de material. A pressão de contato determina o número de cavacos e a seção de usinagem enquanto que a velocidade de corte determina os cavacos usinados na unidade de tempo e o comprimento médio dos cavacos (KÖNIG, 1989).

Decisivo para o comportamento das curvas é a composição da velocidade de corte e de suas componentes (KÖNIG, 1989). A taxa de remoção de material é influenciada mais pelas mudanças na velocidade de oscilação do que pela velocidade periférica (JUCHEM, 1986).

Velocidades de oscilação mais altas criarão ângulos de cruzamento α maiores para uma velocidade periférica constante e, inversamente, aumentando a velocidade periférica para uma velocidade de oscilação constante, o ângulo α diminui. Frequentemente um determinado ângulo α é necessário para um componente e, neste caso, o aumento da taxa de remoção de material

pelo emprego de velocidades de corte mais altas significa que ambos os componentes tem que ser aumentados. Entretanto, a velocidade de oscilação não pode ser aumentada indefinidamente devido à massa da máquina que tem que ser revertida no final de cada curso (JUCHEM, 1986).

Na prática, um ângulo de cruzamento α entre 40 e 70° tem se mostrado vantajoso, em relação à taxa de remoção de material efetiva, independentemente do tamanho do grão abrasivo, dureza do ligante e pressão de contato utilizados (KÖNIG, 1989).

A melhoria da cilindricidade e da circularidade também está correlacionada com a composição da velocidade, sendo que tanto a velocidade periférica quanto a axial podem ser otimizadas. A superposição das componentes otimizadas leva a um ângulo de cruzamento de aproximadamente 45°. A dependência entre o erro de forma e o ângulo de cruzamento pode ser explicada pelo fato que o volume usinado efetivo na unidade de tempo em muitos processos também alcança um maior valor para $\alpha = 45^\circ$. No entanto, esse valores otimizados não podem ser generalizados (KÖNIG, 1989).

O aumento do ângulo de cruzamento α , através do aumento da velocidade de corte, aumenta a solitação e desgaste dos grãos abrasivos, devido à solitação mecânica alternante. As forças atuantes variam de acordo com a posição, valor e sentido do ângulo α , sendo que quanto maior a diferença no sentido de ação da força, mais provável que seja superado o valor da força admissível sobre o grão e ligante. Para ângulo de cruzamento grandes os grãos quebram antes (KÖNIG, 1989).

Segundo PAULL et al., 1967, a velocidade de oscilação afeta a ação do abrasivo, sendo que grandes velocidades de avanço aumentam a ação de dressamento da pedra causando um acabamento superficial ruim. Velocidades periféricas excessivas, entretanto, contribuem para diminuir a precisão dimensional, superaquecendo a peça e cegando os grãos abrasivos. O superaquecimento causa a deterioração do fluido de corte e distorções na peça, enquanto que o cegamento dos grãos afeta principalmente as dimensões finais.

De acordo com KÖNIG, 1989, o aumento da velocidade de corte possui uma influência positiva sobre a qualidade da superfície. No entanto, os valores de rugosidade obtidos são grandemente afetados pelo tempo de brunimento. Para uma melhor comparação dos valores de rugosidade, devem ser escolhidas condições iniciais da peça que não influenciem o resultado do trabalho, isto é, peças que foram usinadas por um tempo suficientemente longo.

A figura 5.6 mostra que para um tempo de remoção de 36 s, a influência da velocidade de corte se reduz consideravelmente sobre a rugosidade quando comparado com um tempo de remoção de 4 s.

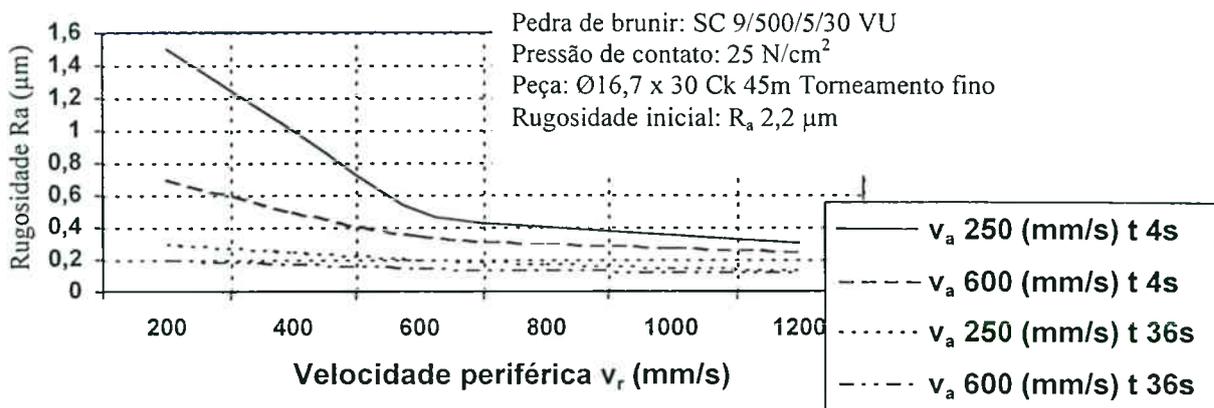


Figura 5.6 – Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade (KÖNIG, 1989)

5.2.2 Influências do curso sobre o resultado do brunimento

O comprimento do curso tem uma influência muito grande sobre a precisão de forma. O erro de cilíndricidade é grandemente afetado pelo curso da ferramenta. Quanto maior o curso mais alargadas serão as extremidades do furo brunido, conforme ilustrado na figura 5.7 (KÖNIG, 1989, JUCHEM, 1986).

A causa para essa configuração variável da forma do furo depende do comprimento livre da ferramenta l_u , do comprimento útil da ferramenta e da pressão de contato nas extremidades do furo (KÖNIG, 1989).

KÖNIG, 1989 e JUCHEM, 1986 descrevem as seguintes influências do curso sobre o erro de forma em duas situações diferentes a seguir.

Se o comprimento livre da ferramenta $l_u = 0$, ou seja, a inversão do sentido do movimento axial é realizada quando a pedra abrasiva atinge a extremidade do furo, nesta posição tem-se um menor número de grãos abrasivos atuando, promovendo uma menor remoção de material e proporcionando uma redução do diâmetro na entrada e saída do furo.

Ao contrário, se a pedra abrasiva ultrapassa as extremidades do furo com um comprimento livre l_u muito grande, a pressão de contato específica aumenta com a redução da área de contato entre a pedra abrasiva e a superfície do peça causando, assim, uma alta taxa de remoção de material nestas regiões resultando no alargamento das extremidades do furo.

Para atingir a forma cilíndrica otimizada nas extremidades do furo, deve-se fazer uma otimização do comprimento livre, l_u , da ferramenta de brunir (KÖNIG, 1989).

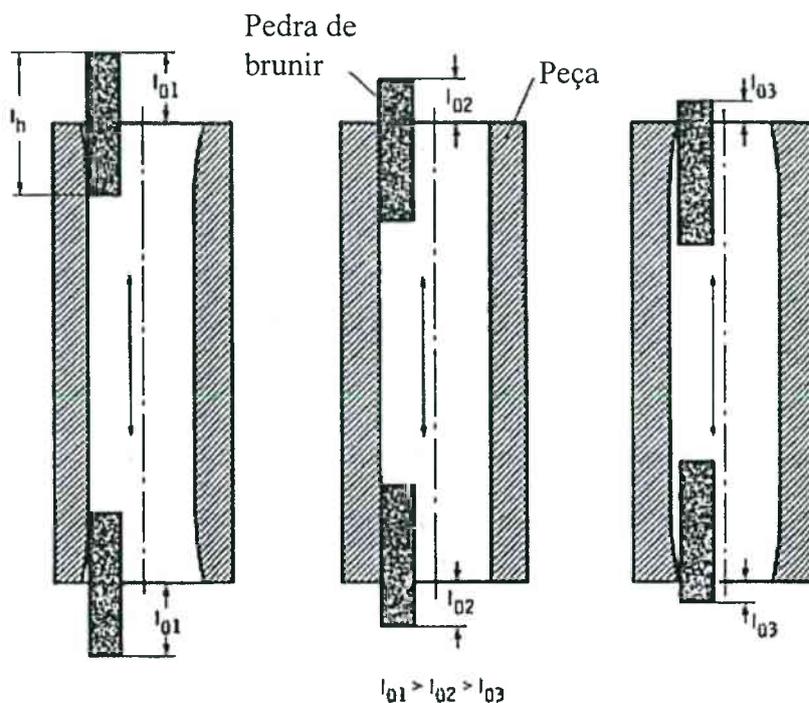


Figura 5.7 – Influência do curso sobre o erro de cilindricidade (KÖNIG, 1989)

De acordo com JUCHEM, 1986, para furos passantes são utilizadas, como regra geral, pedras abrasivas com comprimento de cerca de 2/3 do comprimento do furo e curso que permita a saída de 1/3 do comprimento da pedra das extremidades do furo. O brunimento de furos cegos é mais difícil mas pode ser resolvido através do retardo da inversão do sentido de movimento axial, chamado de retardo do curso.

Para a otimização do comprimento livre da ferramenta no brunimento de furos cegos deve-se proceder no sentido de aumentar o tempo de permanência da ferramenta no fundo do furo, retardo do curso, aumentar a pressão de contato e otimizar o comprimento livre da ferramenta (KÖNIG, 1989).

Ferramentas de brunimento com sistemas de medição integrado, item 5.3.4, e máquinas com controle adaptativo, item 5.3.1, permitem a correção automática do diâmetro e da cilindricidade dos furos através da variação do comprimento do curso, da posição da inversão do sentido de avanço axial em relação ao comprimento do furo e do retardo no ponto de reversão. Através deste controle de forma e tamanho altos graus de precisão são obtidos em furos cegos e cônicos.

5.2.3 Influências da pressão de contato sobre o resultado do brunimento

No brunimento convencional o avanço radial da ferramenta é aplicado através da expansão da ferramenta de brunir radialmente, criando, dessa forma, uma pressão entre a ferramenta e a superfície da peça.

Como já descrito anteriormente, este mecanismo não existe no brunimento de passe único, já que a ferramenta é ajustada somente uma vez para a retirada de determinada quantidade de material.

A aplicação da pressão de contato através de mecanismos hidráulicos é a mais utilizada no brunimento convencional (JUCHEM, 1986). A pressão necessária para o brunimento é variável e difícil de ser determinada. É dependente do tipo e dureza do material, das características do furo e do tipo e dureza da pedra abrasiva utilizada (ELLIS, 1959).

Com o aumento da pressão de contato os gumes dos grãos abrasivos que compõem a pedra de brunimento penetram a uma profundidade maior na superfície da peça, até que seja alcançada a posição de equilíbrio entre a penetração dos grãos e o número de grãos em ação correlacionados com a pressão de reação. O maior número de gumes e a maior penetração dos diversos gumes leva ao aumento do número de cavacos produzidos e da seção de usinagem destes cavacos. Um aumento da pressão de contato, com as demais variáveis mantidas constantes, leva a um aumento da taxa de remoção de material do brunimento (KÖNIG, 1989).

A figura 5.8 a seguir, ilustra o efeito na taxa de remoção de material de diferentes pressões de contato específica aplicadas sobre a pedra de brunimento na usinagem de furos de ferro fundido com pedras de grãos de diamante e ligante metálico. Para o caso em particular, ocorreu um aumento quase linear na taxa de remoção de material com o aumento da pressão de contato específica (JUCHEM, 1986).

Com o aumento da pressão de contato teremos um aumento da seção do cavaco que leva a um aumento da força de corte (KÖNIG, 1989). A força de corte deve ser entendida como a soma vetorial das componentes tangencial e de avanço. O comportamento da força de corte em relação à pressão de contato varia com o tempo devido à mudança da capacidade de corte da pedra abrasiva. A força de corte diminui com o tempo, para uma mesma pressão de contato, devido à menor capacidade de penetração dos gumes abrasivos da pedra desgastada (PERES, 1994).

Forças de corte maiores aumentam a sollicitação da ferramenta, levando a uma quebra de grãos e ligante e aumentando também o desgaste da ferramenta (KÖNIG, 1989).

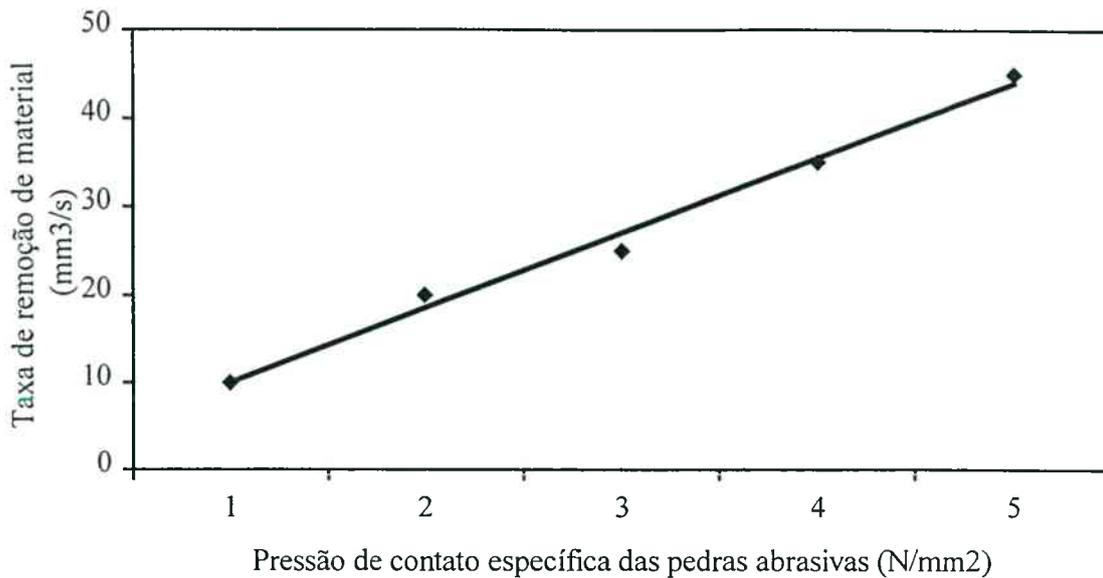


Figura 5.8 – Efeito da pressão de contato específica sobre a taxa de remoção de material

O valor da pressão de contato e o método de aplicação influenciarão a qualidade da superfície final (JUCHEM, 1986). Pressões de contato acentuadas expõem grãos afiados devido à quebra dos grãos e ligante, afetando a rugosidade da superfície produzida. A figura 5.9 representa a remoção de material, desgaste da ferramenta e rugosidade R_y em função da pressão de contato, segundo KÖNIG, 1989. Pressão de contato insuficiente resulta em taxas de remoção de material muito baixas, enquanto que pressões de contato excessivas resultam em um acabamento superficial ruim e desgaste excessivo da pedra abrasiva (PAULL et al., 1967).

O erro de circularidade é pouco influenciado pela pressão de contato. A cilindridade, no entanto, é influenciada consideravelmente pela pressão de contato, aumentando com o aumento desta, principalmente devido à abertura do furo na parte superior. Essa abertura ocorre pelo tombamento da ferramenta, que aumenta com a pressão de contato e com o aumento da força correlacionada (KÖNIG, 1989), figura 5.10.

A força de contato F_o é sempre maior que a força F_u , causando pressões de contato localizadas maiores na abertura superior do furo e, com isso, maior taxa de remoção de material (KÖNIG, 1989).

5.3 Influências do sistema de trabalho sobre o resultado do brunimento

Neste item será não somente discutida a influência do sistema de trabalho sobre o resultado do brunimento, mas também serão apresentadas as características necessárias do

sistema para a obtenção de um bom resultado.

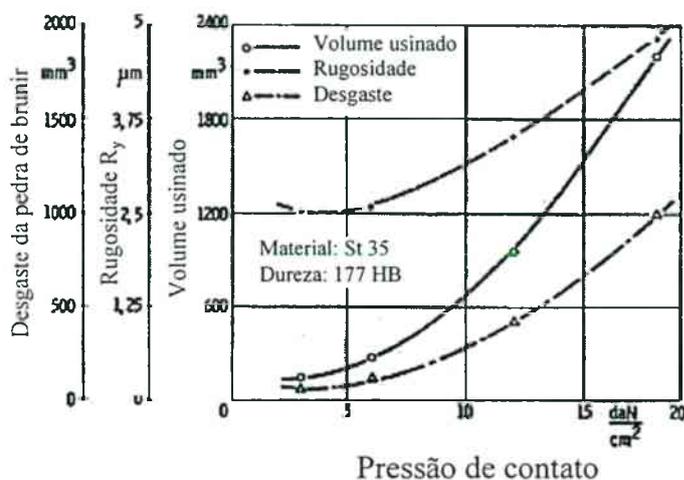


Figura 5.9 – Remoção de material, desgaste da ferramenta e rugosidade R_y em função da pressão de contato (KÖNIG, 1989)

5.3.1 Características da máquina e dispositivos de fixação e suas influências sobre o resultado do brunimento

- *Influências dos dispositivos de fixação*

Uma característica do brunimento que torna possível a obtenção de furos com alta precisão geométrica e de forma é a relação entre as faces de corte das pedras abrasivas com a superfície que está sendo brunida, a qual é completamente independente da máquina (WICK et al., 1985).

Esta característica é conseguida através da adoção de dispositivos de fixação que permitem que a ferramenta flutue em relação à peça, uma vez que é praticamente impossível, na prática, alinhar o eixo da ferramenta com o furo a ser brunido, de modo a conciliar a precisão do resultado requerido com a quantidade de material a ser removida (MILLER, 1996).

Podem ser usados dispositivos de fixação de ferramentas rígidos e dispositivos de fixação de peças flutuantes ou ferramentas flutuantes e dispositivos rígidos, figura 5.11 (WICK et al., 1985 e MILLER, 1996). O fato de ou a ferramenta ou a peça flutuar permite que a ferramenta exerça pressão de contato igualmente distribuída nas paredes do furo, independentemente da vibração da máquina ou no ambiente (WICK et al., 1985).

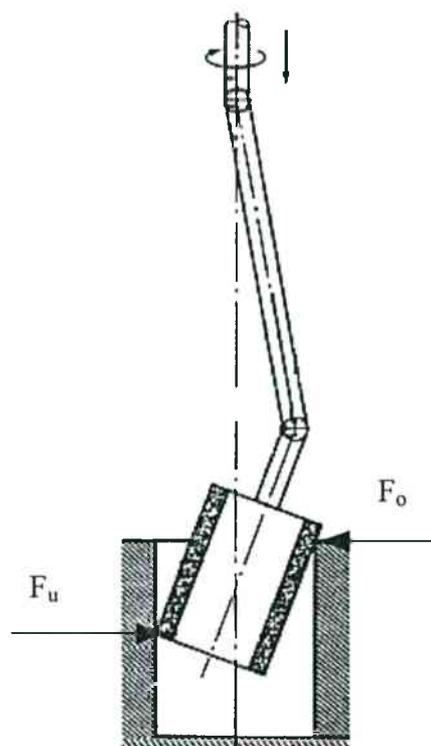


Figura 5.10 – Representação do tombamento da ferramenta de brunir no furo da peça (KÖNIG, 1989)

O brunimento não mudará a localização axial de um furo, a linha de centro da ferramenta segue a linha neutra do furo, estabelecida na operação de usinagem anterior. A fixação deve ser projetada para localizar a peça aproximadamente alinhada com o eixo da máquina e suportar o torque e a força axial da ferramenta sem deformar a peça (WICK et al., 1985 e MARVIN, 1994).

De acordo com MARVIN, 1994, devido às variações na localização do furo, posicionamento da mesa da máquina, precisão do fuso da máquina e posicionamento do dispositivo de fixação da peça, em muitos casos, a utilização de dispositivos flutuantes de fixação de ferramentas e dispositivos rígidos de fixação de peças não é suficiente para garantir precisão desejada. Embora o dispositivo de fixação flutuante da ferramenta permita que o eixo da ferramenta seja reposicionada em relação ao eixo do furo dentro de poucos milésimos de milímetro, as forças envolvidas são geralmente suficientes para a perda da precisão de forma do furo dentro de $1 \mu\text{m}$.

Devido à sua extrema capacidade de flutuação, dispositivos de fixação de ferramentas do tipo dupla junta universal, figura 5.12, são algumas vezes utilizados com resultados muito bons. Entretanto, a partir de determinadas velocidades de rotação estas fixações tendem a “chicotear”

devido à força centrífuga. Assim, os tempos do ciclo são afetados, e pequenos diâmetros a serem brunidos podem se tornar impraticáveis.

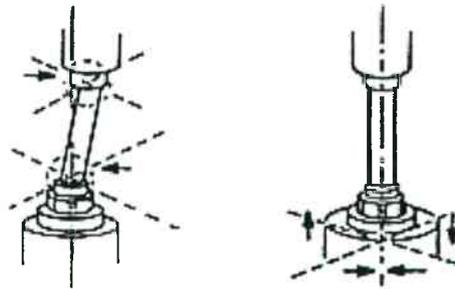


Figura 5.11 – Efeito de flutuação dos dispositivos de fixação: ferramenta flutuante, esquerda e peça flutuante, direita (WICK et. al., 1985)

Os melhores resultados foram obtidos através da utilização de dispositivos de fixação de ferramentas flutuantes em conjunto com um dispositivo de fixação de peças do tipo pendular. Esta fixação permite que o furo existente da peça flutue radialmente e angularmente, proporcionando um alinhamento perfeito com forças muito pequenas envolvidas, figura 5.13.

- *Influências da máquina*

A escolha do método e do tipo da máquina adequada depende de vários fatores como: tamanho e forma da peça, quantidade de peças a serem brunidas, tolerâncias a serem alcançadas, disponibilidade de equipamentos e de operadores.

Para as aplicações que requerem apenas uma ferramenta, várias máquinas convencionais podem ser utilizadas, tais como furadeiras, fresadoras, tornos, centros de usinagem e, é claro, brunidoras (MARVIN, 1998, ELLIS, 1959).

Quando somente algumas poucas peças necessitam de acabamento elas podem ser brunidas com sucesso em máquinas convencionais, nas quais podem ser feitas adaptações para os movimentos de rotação e oscilação (alternante). O movimento de avanço radial das pedras abrasivas é realizado manualmente (PAULL et al., 1967).

Em produções maiores ou para aplicações com múltiplas ferramentas, entretanto, o brunimento é realizado com máquinas projetadas e construídas para este propósito. Estas máquinas estão disponíveis em uma larga gama de tamanhos e projetos, com variações horizontais e verticais, manuais e automáticas, com um ou vários fusos (PAULL et al., 1967, MARVIN, 1998).

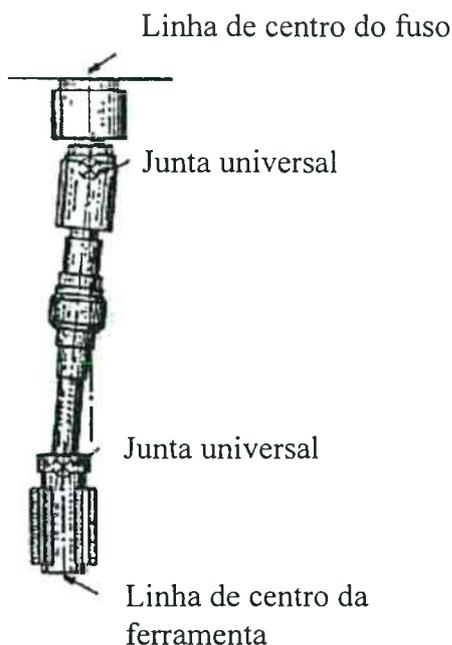


Figura 5.12 – Fixação de ferramenta tipo dupla junta universal (WICK et. al., 1985)

As máquinas de brunimento manual rotacionam a ferramenta a uma velocidade pré-estabelecida enquanto o operador segura a peça e realiza o movimento de oscilação da peça sobre a ferramenta. Estas máquinas geralmente apresentam o eixo da ferramenta horizontal e podem ser equipadas com mecanismos para o controle do avanço radial das pedras abrasivas (PAULL et al., 1967).

O brunimento manual é mais utilizado quando as dimensões e formato da peça permitem que o operador possa segurá-la e em menores tamanhos de lotes de peças. De acordo com PAULL et al., 1967, o brunimento manual pode ser utilizado quando as tolerâncias ou acabamentos a serem alcançadas são pequenas, já que o operador pode lançar mão de várias técnicas para obter a precisão desejada como a reversão da entrada da ferramenta, mudança no comprimento do curso e o rápido acesso ao furo para constantes medições.

No brunimento com máquinas automáticas a peça é usualmente fixada em dispositivos, enquanto a máquina fornece os movimentos de rotação e oscilação à ferramenta. O avanço radial das pedras abrasivas pode ser realizado manualmente mas, mais freqüentemente, um controle automático, hidráulico, pneumático ou eletro-mecânico é utilizado para manter uma pressão constante das pedras abrasivas sobre as paredes do furo.

O comprimento da peça geralmente determina o uso de máquinas verticais ou horizontais.

As máquinas verticais, figura 1.3, permitem obter furos com melhor forma cilíndrica do que máquina horizontais, além de facilitar a fixação das peças. Nas máquinas horizontais automáticas o furo brunido pode resultar levemente fora de centro devido à ação da gravidade sobre a ferramenta e sua fixação (PAULL et al., 1967, ELLIS, 1959).

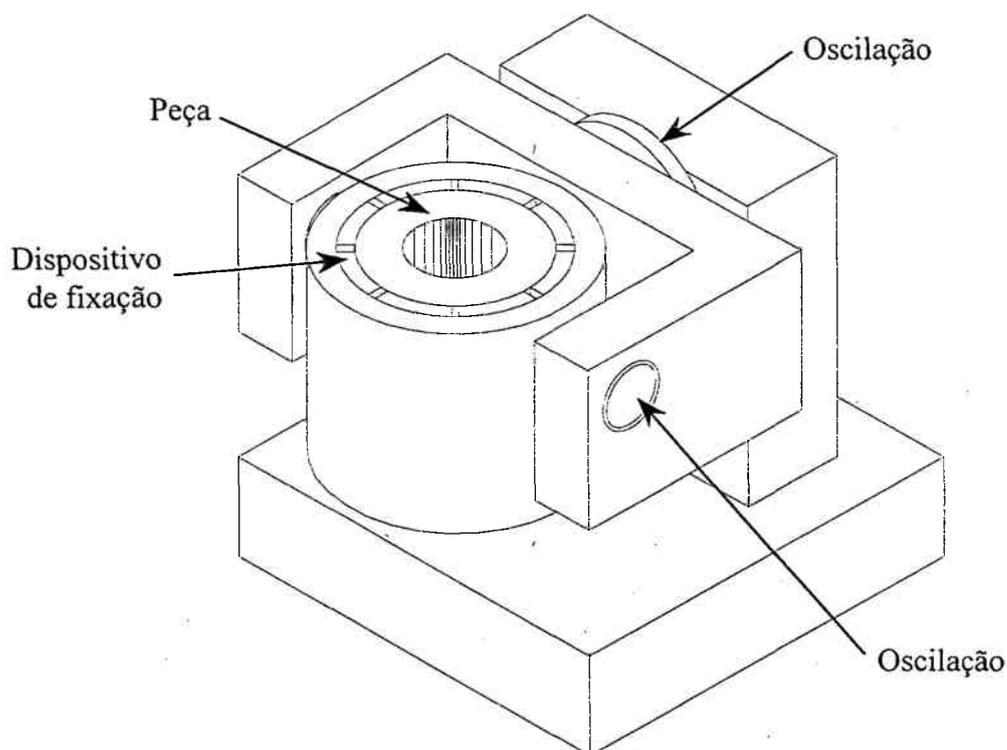


Figura 5.13 – Dispositivo de fixação de peças tipo pendular

As máquinas de brunir verticais foram as que mais avançaram tecnologicamente, sendo as mais utilizadas na indústria com alto volume de produção (BATES, 1998). Vários aperfeiçoamentos foram incluídos, visando a automatização e obtenção de maior precisão dimensional do furo tais como: utilização de máquinas modulares (BATES, 1998), máquinas com múltiplos fusos (KOPP, 1986, NOAKER, 1995), controle CNC (NOAKER, 1995, MARVIN, 1994; LIVERTON et al., 1994), alta frequência (KOPP, 1995, FLORES, 1994, WESTKAMPER et al., 1994), controle automático da expansão radial da ferramenta (PAULL et al., 1967, ELLIS, 1959, LIN, 1994). A aplicação de máquinas CNC, de alta frequência e inovações no controle automático de expansão da ferramenta será discutida no capítulo 6.

As linhas de brunimento são constituídas de máquinas com construção modular freqüentemente contendo estações para medição do pré-furo, brunimento de desbaste, semi-acabamento e acabamento e escovamento. Sistemas flexíveis de brunimento são constituídos de um ou dois fusos, para a remoção de determinada quantidade de material da peça, que podem ser utilizados em sistemas flexíveis de fabricação (NOAKER, 1995, BATES, 1998).

Outro sistema de brunimento pode possuir configuração rotatória. A máquina, também chamada centro de brunimento de múltiplos fusos, é formada por uma mesa rotatória indexável com várias estações (seis, oito, doze, etc.) e múltiplos fusos de brunimento. Cada estação da mesa, onde as peças são fixadas, possui uma função que pode ser: carga e descarga da peça, brunimento de desbaste, semi-acabamento e acabamento, escovamento e medição. Os fusos para brunimento, escovamento e medição podem estar arrançados de forma intercalada enquanto a máquina pode corrigir automaticamente, durante a usinagem, o curso e a posição da inversão do movimento axial (KOPP, 1986, NOAKER, 1995).

5.3.2 Características da peça e suas influências sobre o resultado do brunimento

O resultado do brunimento depende do estado inicial da peça, assim, as características e propriedades do material, bem como a usinagem anterior possuem grande importância (KÖNIG, 1989).

Qualquer material metálico pode ser brunido: ferro fundido, todos os tipos de aço e carbonetos, latão, bronze, alumínio, cromo, prata, etc. Muitos materiais não-metálicos também podem ser brunidos, como por exemplo: vidro, cerâmica e plástico (ELLIS, 1959, WICK et al., 1985).

Quanto ao tamanho, podem ser brunidas peças com diâmetros que variam de 1,52 mm até 1,5 m e comprimento até 15 m. A limitação para o tamanho da peça é a máquina que necessita possuir a potência necessária para movimentar a ferramenta e espaço para acomodar a peça (ELLIS, 1959, PAULL et al., 1967, WICK et al., 1985).

Qualquer superfície cilíndrica que possua área suficiente para estabilizar a ferramenta pode ser brunida. Isto inclui furos passantes, furos cegos, furos com rasgos de chaveta e furos cônicos. O brunimento de furos cegos foi apresentado no item 5.2.2 (ELLIS, 1959, PAULL et al., 1967).

Quando o diâmetro do furo excede seu comprimento é possível brunir várias peças montadas firmemente umas sobre as outras e com os furos alinhados. Entretanto, para a obtenção de furos retilíneos é necessário que as faces das peças sejam paralelas (PAULL et al., 1967).

Furos cônicos também podem ser obtidos através do brunimento com a utilização de ferramentas e máquinas especiais.

Muitos erros causados pela usinagem anterior, tratamento térmico e deformações devido à fixação podem ser corrigidos. A figura 5.14 ilustra alguns erros em furos que podem ser corrigidos pelo brunimento (WICK et al., 1985). A correção destes erros depende da geometria da ferramenta, que será tratada no item 5.3.3 a seguir.

ELLIS, 1959 e PAULL et al., 1967 afirmam que a dureza do material não limita o processo de brunimento, afetando somente a taxa de remoção de material que é maior para materiais mais moles.

KÖNIG, 1989, por sua vez, afirma que a dureza também tem influência sobre a qualidade superficial da peça brunida. Isto se deve ao fato dos materiais duros não apresentarem deformação plástica na ranhura produzida pelo grão abrasivo e dos materiais dúcteis fecharem os poros da pedra abrasiva, piorando a rugosidade da superfície.

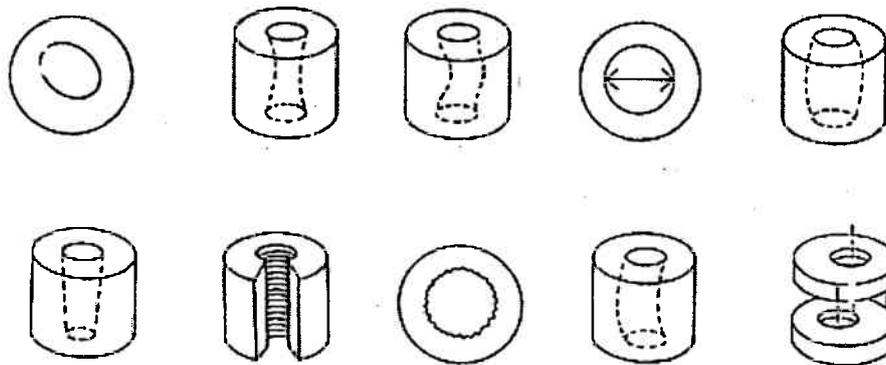


Figura 5.14 – Erros em furos que podem ser corrigidos pelo brunimento (WICK et. al., 1985)

Outro fator que leva à diminuição da rugosidade da superfície é o emprego de grãos desgastados, cegos, que possuem um efeito de alisamento na superfície, desde que estes grãos permaneçam por um tempo suficientemente longo no ligante.

A taxa de remoção de material no brunimento para uma rugosidade inicial elevada é grande devido à pressão localizada mais elevada durante o tempo em que a ferramenta encosta nos picos de rugosidade e também ao efeito de auto-afiação da pedra abrasiva pela superfície áspera da peça. Para uma rugosidade inicial muito pequena esse efeito necessário de auto-afiação é, em parte, suprimido.

Ainda de acordo com KÖNIG, 1989, o erro de forma inicial da peça exerce uma influência considerável sobre o resultado do trabalho. A medida de correção do erro depende principalmente do tipo da ferramenta, como será abordado no item 5.3.3. A rugosidade inicial da peça também tem influência sobre a correção do erro. Grandes rugosidades iniciais permitem a correção do erro de forma desde que a remoção do material esteja na ordem de grandeza deste erro. Se a rugosidade é maior que o erro de forma, a correção do erro é realizada durante a remoção da rugosidade.

5.3.3 Características da ferramenta e suas influências sobre o resultado do brunimento

Uma variedade muito grande de ferramentas de brunir foram desenvolvidas para atender as variadas geometrias dos furos (furo cego ou furo interrompido), configuração da peça bruta (erro de forma, material e tipo da pré-usinagem), diâmetro e comprimento do furo, precisão e rigidez (KÖNIG, 1989).

O desempenho de uma ferramenta, mantidos constantes todos os outros fatores, depende da configuração da ferramenta e da especificação e dimensões das pedras abrasivas (JUCHEM, 1986).

- **Configurações das ferramentas de brunir**

As configurações das ferramentas de brunir diferem de acordo com seu uso manual ou automático.

- *Ferramentas manuais*

Uma ferramenta para brunimento manual consiste de uma ou mais pedras abrasivas, um mandril, um calço em forma de cunha e sapatas-guia (PAULL et al., 1967). A figura 5.15 ilustra uma ferramenta de brunimento manual. O espaçamento angular desigual da pedra abrasiva em relação às sapatas guias tem a função de facilitar a remoção do material e garantir a melhoria da cilindricidade e paralelismo do furo. As ferramentas manuais de pedra única giram concêntricamente somente quando o diâmetro final do furo é alcançado (PAULL et al., 1967, JUCHEM, 1986).

A função do mandril é prender, sustentar e guiar o abrasivo, localizar e guiar a ferramenta durante o brunimento. O mandril suporta também as duas sapatas-guia que estabilizam a peça e reagem contra a pedra abrasiva proporcionando três pontos de contato na parede do furo (ELLIS, 1959).

O calço em forma de cunha, que controla o avanço radial da pedra abrasiva, pode ser acionado através de mecanismos manuais ou automáticos (PAULL et al., 1967).

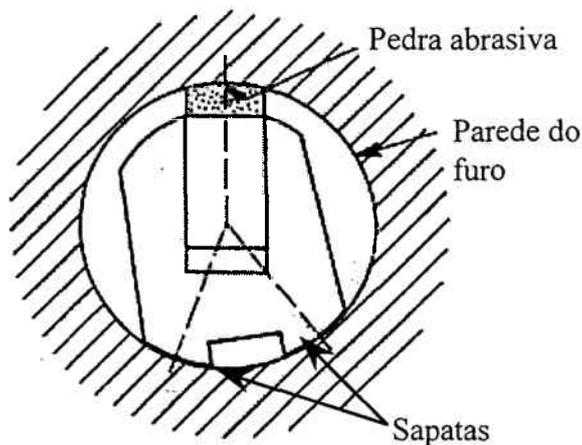


Figura 5.15 – Ferramenta de brunimento manual (WICK et. al., 1985)

O brunimento de furos contendo irregularidades na superfície, como rasgos de chaveta, e furos cegos são possíveis através de ferramentas projetadas para esta finalidade, como ilustrado na figura 5.16. No brunimento de furos com chavetas são utilizadas duas pedras abrasivas dispostas lado a lado. Já no brunimento de furos cegos, a pedra abrasiva e as sapatas devem possuir o mesmo comprimento, para garantir um desgaste uniforme, e mais curtas que o furo (PAULL et al., 1967).

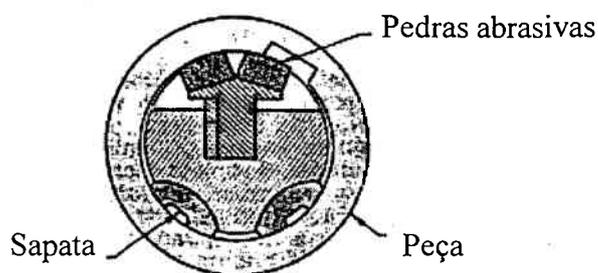


Figura 5.16 – Ferramenta para brunir furos com rasgo de chaveta (PAULL et. al., 1967)

- Ferramentas automáticas

As ferramentas para o brunimento automático usualmente possuem as pedras abrasivas espaçadas igualmente na circunferência e podem ou não incluir as sapatas-guia. As pedras

abrasivas são expandidas radialmente e igualmente do centro da ferramenta, através de cones, fornecendo, assim, igual pressão em todos os lados do furo e estabilizando a ferramenta na linha de centro do furo. Como no brunimento manual, a ferramenta de brunir automática pode possuir várias configurações, dependendo da aplicação (PAULL et al., 1967, ELLIS, 1959).

O avanço radial da ferramenta pode ser manual mas, usualmente, são utilizados métodos de expansão automáticos através de pressão constante ou avanço constante. O corpo da ferramenta deve possuir áreas abertas para permitir um bom fluxo do fluido na região abrasiva durante o brunimento (PAULL et al., 1967).

A figura 5.17 ilustra vários tipos de ferramentas de brunimento de curso longo.

Ferramentas de brunir com duas pedras abrasivas, figura 5.17b, possuem a vantagem que as pedras podem ser expandidas concentricamente. Elas são muito robustas e são capazes de taxas de remoção mais altas do que as ferramentas com pedra única. A cilíndricidade obtida, entretanto, não é muito boa. Por isso, este tipo de ferramenta é utilizada como ferramenta de desbaste onde altas taxas de remoção de material são desejáveis (JUCHEM, 1986).

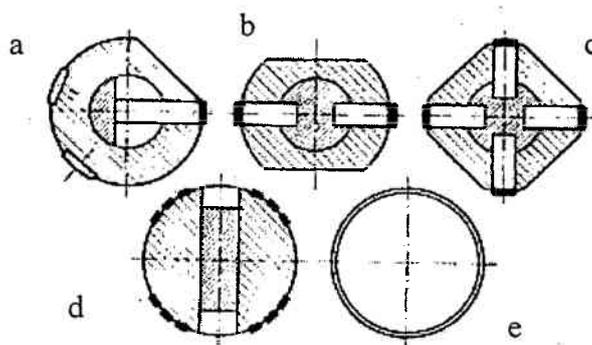


Figura 5.17 – Ferramentas para brunimento de curso longo. a) uma pedra abrasiva, b) duas pedras abrasivas, c) quatro pedras abrasivas, d) múltiplas pedras abrasivas ou tipo casca e e) de passe único (JUCHEM, 1986)

As ferramentas de brunir com quatro pedras abrasivas, figura 5.17c, também proporcionam altas taxas de remoção de material mas, devido à sua configuração, são mais caras e menos robustas. Estas ferramentas não devem ser utilizadas para furos interrompidos, pois os furos poderiam facilmente se tornar excêntricos devido à pequena largura das pedras abrasivas necessária para alcançar a pressão de brunimento específica necessária para o processo de formação de cavaco.

Onde existe risco de ondulação e marcas de vibração, devido à forma do furo, são utilizadas as chamadas ferramentas de brunir tipo casca, figura 5.17d. Estas ferramentas proporcionam uma área de contato e suporte extremamente grande e são, normalmente, formadas por dois semi-cilindros que podem ser expandidos e que suportam camadas abrasivas na forma de grandes anéis segmentados ou com um grande número de pequenas pedras.

Uma outra variação quanto ao formato da ferramenta e características do processo é o brunimento de passe único. Este método utiliza uma ferramenta que não expande durante o processo de brunimento, sendo ajustada uma única vez durante a preparação, figura 5.17e. As ferramentas e o processo de brunimento de passe único serão abordados com mais detalhes no capítulo seguinte.

Além das configurações apresentadas, existem também ferramentas de brunir equipadas com dois ou mais jogos de pedras abrasivas diferentes, para desbaste e acabamento, que podem ser utilizadas na mesma ferramenta através da expansão apropriada do jogo de pedras.

- **Influências da geometria e especificação das ferramentas sobre o resultado do trabalho**

O comprimento da pedra abrasiva tem grande importância para a correção dos erros de cilindridade, sendo os melhores resultados atingidos com pedras mais longas que transmitem sua forma cilíndrica para a forma da peça (KÖNIG, 1989).

A figura 5.18a mostra que para uma pedra abrasiva muito curta, o contorno do erro de forma é acompanhado pela ferramenta e não é eliminado. Pedras muito curtas também causam o tombamento da ferramenta na posição superior do curso, causando um alargamento excessivo da extremidade superior do furo.

Somente quando a pedra abrasiva encontra um apoio total sobre duas ondulações consecutivas há condições de melhorar a cilindridade do furo, figura 5.18b. As pedras abrasivas se apoiam sobre os picos das ondulações sem remover material dos vales.

A largura da pedra abrasiva, por sua vez, influencia a eliminação do erro de circularidade. A peça assume a circularidade prescrita pela ferramenta quando a pedra abrasiva se apoia simultaneamente sobre, no mínimo, duas cristas da ondulação, figura 5.19.

O número de pedras abrasivas e sua distribuição na circunferência da ferramenta também afetam a correção da circularidade, como visto anteriormente na descrição das configurações das ferramentas de brunir.

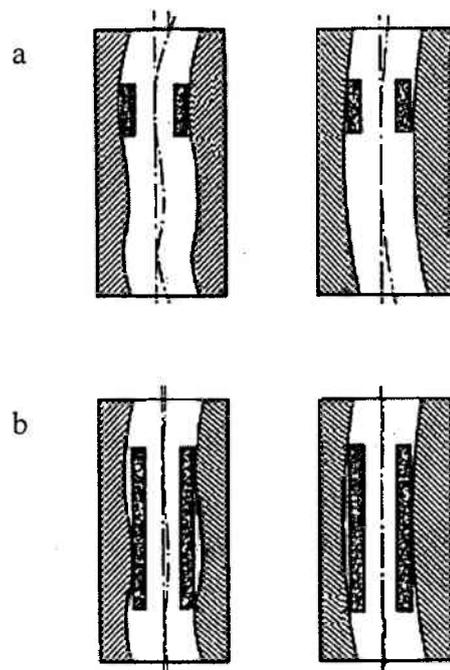


Figura 5.18 – Influência do comprimento das pedras abrasivas sobre o erro de cilindricidade (KÖNIG, 1989)

O aumento do tamanho de grão causa uma maior taxa de remoção de material, uma maior rugosidade da superfície e um menor desgaste. Quanto à cilindricidade do furo, os grãos abrasivos maiores tem uma influência negativa. Dessa forma, no brunimento de desbaste o erro de cilindricidade do furo deve ser mantido abaixo de um determinado valor para que possa ser corrigido nas operações de acabamento.

Quanto ao tipo de abrasivo utilizado nas ferramentas, o uso de superabrasivos, diamante e CBN ocasiona menores valores de erro de cilindricidade e uma maior precisão da medida do furo devido à sua elevada resistência ao desgaste. No brunimento de materiais dúcteis, entretanto, ocorrem problemas de entupimento da porosidade da superfície da pedra abrasiva, levando a caldeamentos do material da peça e com isso uma diminuição considerável na qualidade da superfície.

5.3.4 Características dos meios auxiliares e suas influências sobre o resultado do brunimento

- Fluido de corte

Quatro componentes básicos de qualquer processo de fabricação são a peça, a máquina, a ferramenta e o fluido usado. Um bom funcionamento do processo é alcançado quando todas as

variáveis escolhidas satisfazem o objetivo desejado.

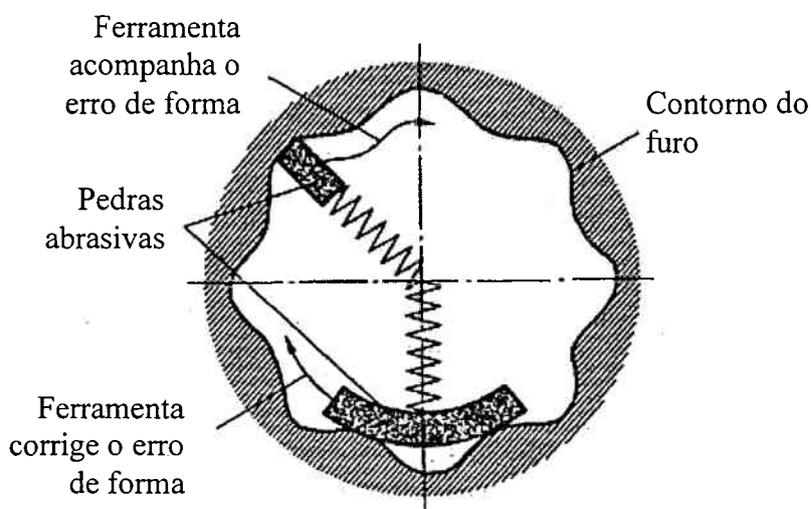


Figura 5.19 – Influência da largura da pedra abrasiva sobre o erro de circularidade (KÖNIG, 1989)

Os fluidos utilizados no brunimento desempenham um número de papéis interrelacionados que são: inundar a zona de trabalho para promover a lubrificação e o resfriamento e promover e proteger a qualidade da superfície da peça (BRUMGARD, 1997).

KOELSCH, 1984a, revela que o fluido ideal mantém a ferramenta diamantada limpa e não permite a adesão do cavaco na superfície da ferramenta, que deve permanecer limpa o tempo todo. O fluido pode fazer a diferença entre o sucesso e o fracasso do processo.

Segundo KÖNIG, 1989, os óleos de brunimento devem satisfazer as seguintes exigências:

- efeito de lavação: para atingir uma boa qualidade superficial as partículas removidas devem ser rapidamente levadas para fora do poro. Para tanto, o óleo deve ser fino e possuir baixa viscosidade para ter alta capacidade de lavação sendo fornecido para a região de trabalho em grande quantidade.
- efeito de lubrificação: é necessário quando são brunidos materiais que produzem cavacos longos e pode ser conseguido através do aumento da viscosidade do óleo.
- efeito de refrigeração: para evitar desvios dimensionais devido ao aquecimento das peças. Grandes reservatórios e equipamentos de refrigeração garantem uma temperatura constante do óleo de brunimento.

KOELSCH, 1994a, sustenta que a escolha do fluido de brunimento depende da gama de

peças usinadas. Na usinagem de peças de variados materiais deve-se escolher um fluido versátil, sendo freqüentemente escolhidos os óleos puros, não-miscíveis em água, à base de petróleo.

KÖNIG, 1989, fornece uma formulação de óleo de corte para o brunimento baseada em uma mistura de querosene e óleo hidráulico cuja proporção varia de acordo com o material usinado. A mistura de 70% de querosene e 30% de óleo hidráulico é utilizada para o brunimento de ferro fundido. A viscosidade da mistura diminui (aumento da proporção de querosene) com o aumento da dureza do material usinado enquanto que para materiais que produzem cavacos longos o óleo apresenta maior proporção de óleo hidráulico.

KOELSCH, 1994a, classifica os fluidos de corte para brunimento em três categorias: emulsões de óleo, óleos semi-sintéticos e óleos sintéticos.

As emulsões de óleo usam emulsificadores para polarizar os constituintes do fluido e suspender as gotas de óleo na água. São mais utilizados em materiais não-ferrosos. Este óleo necessita de controle biológico pois é atacado por bactérias.

Os fluidos semi-sintéticos são mais complexos que as emulsões pois contém emulsões, água, óleo mineral e componentes orgânicos para melhorar sua molhabilidade e proteger contra a ferrugem. Seu poder de lubrificação é inferior às emulsões e óleos sintéticos.

Já os fluidos sintéticos são formados, geralmente, por soluções de lubrificantes e inibidores de ferrugem dissolvidos em água. Os ingredientes típicos são ácidos orgânicos, aminas e sabões. Os óleos sintéticos fornecem melhor refrigeração, filtrabilidade, lubrificação, proteção à ferrugem, bioresistência e limpabilidade do que as emulsões e óleos semi-sintéticos. Trabalham bem com diamante como abrasivo, como também descrito por KÖNIG, 1989.

BRUMGARD, 1997, alerta que abrasivos adequados para o brunimento com óleos integrais tendem a vitrificar e perder a capacidade de corte quando usados com fluidos diluídos em água.

Uma forma de avaliar a efetividade de um fluido de corte, segundo KOELSCH, 1994a, é o controle da rugosidade do furo brunido. Se o valor da rugosidade R_y é muito maior que dez vezes o valor de R_a , isto é devido, provavelmente, a riscos na superfície provenientes da microsoldagem de material. O maior dano causado por um óleo de brunimento não-adequado é quando o filme que separa a ferramenta e a superfície do furo deixa de existir, causando a solda da ferramenta com a peça ou com os cavacos deixando, assim, grandes riscos na superfície da ferramenta e da peça.

É importante considerar que o bom desempenho do óleo de brunimento depende também do sistema de filtração do fluido, já que qualquer sujeira na área de trabalho pode causar o

aparecimento de riscos na superfície da peça (BRUMGARD, 1997).

WOLF et al., 1986, declaram que o pré-requisito para que seja possível atingir as tolerâncias especificadas na usinagem de blocos de motores de alumínio e uma vida longa das ferramentas de brunir é a limpeza do óleo de corte. Este deve ser filtrado de modo que partículas maiores que 15 μm sejam retidas, além de ter sua temperatura mantida em torno de 20 °C.

Quanto à manutenção, fluidos com base aquosa necessitam de freqüente monitoramento da concentração e do pH. Os óleos à base de petróleo são os mais estáveis devido à sua extraordinária estabilidade e reciclabilidade permitindo seu uso ilimitado desde que seja mantido limpo (KOELSCH, 1994a).

- Controle automático de dimensões

A função de um controle de dimensões automático é parar o avanço radial das pedras abrasivas quando o furo brunido atingir a dimensão final. A seguir inicia um período de tempo em que a pressão nas pedras abrasivas é gradualmente reduzida e então a ferramenta retorna à sua dimensão original e é retirada do furo (WICK et al., 1985, ELLIS, 1959).

Visto que a expansão radial e a oscilação da ferramenta são controladas hidráulicamente, estas operações podem ser controladas pelo acionamento das válvulas hidráulicas. Com os dispositivos de controle automático de dimensão isto é feito eletricamente por solenóides que são controlados por sensores (ELLIS, 1959).

PAULL et al., 1967, WICK et al., 1985 e ELLIS, 1959, descrevem várias formas de controlar automaticamente as dimensões dos furos brunidos, dos quais serão aqui abordadas as três formas mais utilizadas, figura 5.20.

A forma de controle ilustrada na figura 5.20a é formada por um pino ajustável ligado a um sensor. O pino é ajustado para o diâmetro final do furo e é posicionado na peça de forma que force sua entrada neste durante todo o ciclo de brunimento. Assim que for removido material suficiente, chegando o furo à dimensão final, o pino entra no furo finalizando automaticamente o ciclo de brunimento.

Outro método de controle que utiliza um pino como indicador de que o furo da peça atingiu a dimensão final é o controle por dois pontos de contato, figura 5.20b. Neste dispositivo o pino de controle, com diâmetro externo na dimensão final que se quer atingir, faz parte da ferramenta, estando livremente acomodado na haste do brunidor e tentando entrar no furo da peça a cada ciclo. Como o furo aumenta de tamanho no decorrer da operação, o pino entra no furo e realiza contato com o primeiro ponto. Neste momento a expansão das pedras abrasivas é

suspensa, diminuindo a taxa de remoção de material. Quando o pino encontra o segundo ponto de contato, as pedras abrasivas são recuadas e a ferramenta é retirada da peça.

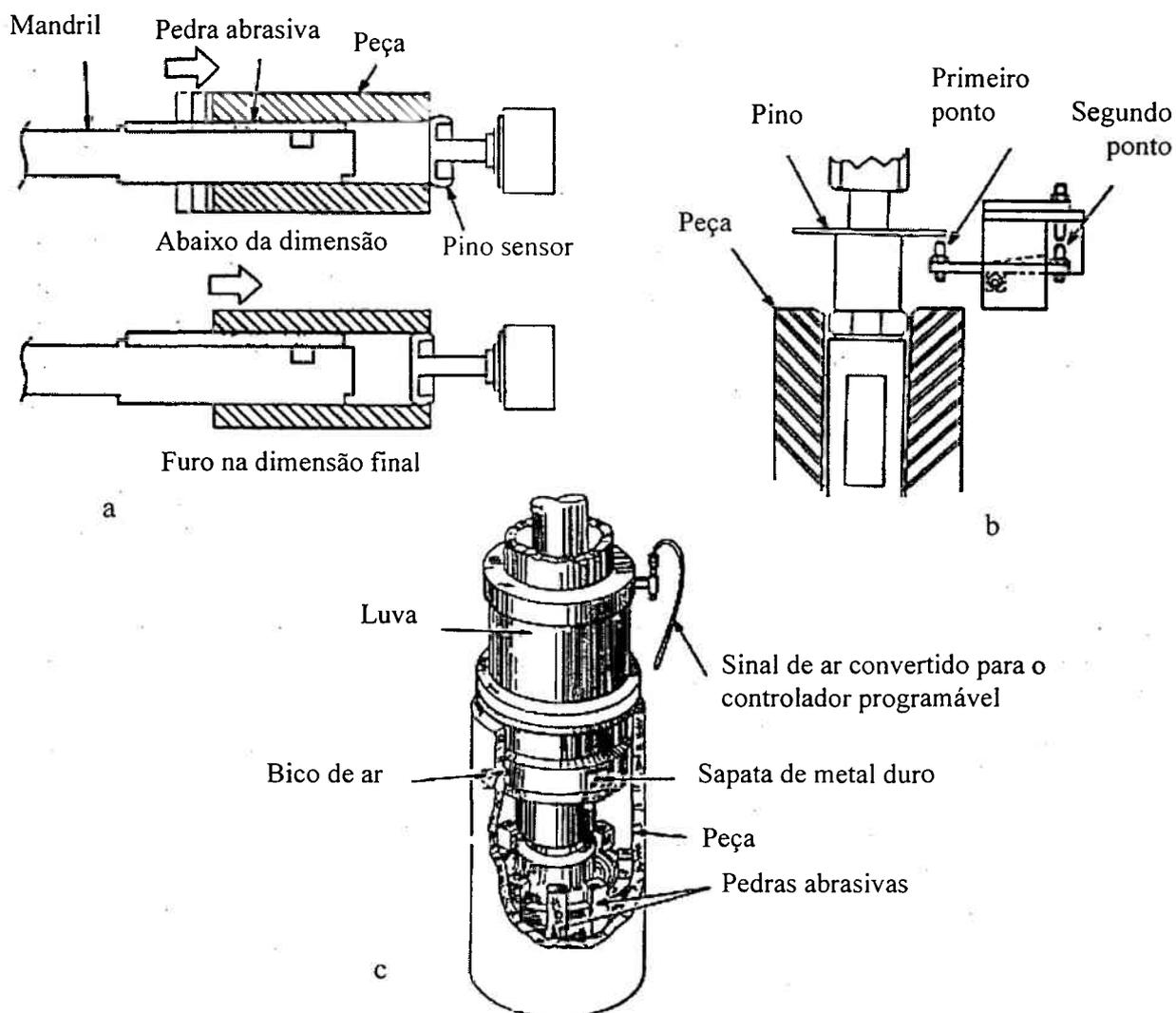


Figura 5.20 – Controles automáticos da dimensão do furo durante o processo de brunimento (WICK et. al., 1985)

O controle automático de dimensão pneumático é utilizado juntamente com circuitos eletrônicos, figura 5.20c. Um dispositivo pneumático entra no furo bruto da peça em cada ciclo de oscilação da ferramenta. Como o diâmetro do furo aumenta, a pressão do ar no circuito diminui. O sinal da pressão do ar é convertido em sinal eletrônico que alimenta o controlador programável da máquina. Quando o diâmetro do furo alcança o tamanho desejado, o ciclo de brunimento é automaticamente concluído.

CAPÍTULO 6

BRUNIMENTO DE PASSE ÚNICO E DESENVOLVIMENTOS RECENTES DOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO

O processo de brunimento de passe único, também conhecido como alargamento abrasivo (“abrasive” ou “superabrasive reaming”) foi originalmente desenvolvido como uma alternativa à lapidação e ao brunimento de curso longo convencional, para melhorar a qualidade dos furos de carcaças de válvulas hidráulicas (MARVIN, 1997).

Durante muitos anos o brunimento de passe único foi considerado como um processo que somente poderia ser aplicado em ferro fundido. “O processo de brunimento de passe único é mais adequado para furos curtos ou interrompidos, que produzem pequeno volume de cavaco, e é mais bem sucedido no ferro fundido (WICK et al., 1985)”.

Desenvolvimentos na aplicação deste processo incluindo o uso de diamante como abrasivo, máquinas, fixações, fluidos de corte e automação do processo tem tornado possível sua aplicação em quase todo material imaginável, desde as variedades mais moles de alumínio até o mais duro dos aços e cerâmicas (MARVIN, 1998).

Os processos de brunimento, não apenas o brunimento de passe único mas também o convencional, por serem processos de grande utilização na indústria, precisão e rapidez, têm sofrido constantes melhorias e adaptações, como será visto a seguir.

6.1 Características do brunimento de passe único

Brunimento de passe único significa que a ferramenta de brunir passa uma única vez pelo furo, removendo uma quantidade pré-determinada de material e promovendo determinado acabamento superficial (SUNNEN, 1993, NAGEL, 1994, JUCHEM, 1986).

A mecânica do brunimento de passe único é simples. O processo consiste de uma ferramenta em forma de barril com diâmetro pré-ajustado e coberta com partículas de diamante ou CBN, que passa através do furo apenas uma vez enquanto a ferramenta, a peça ou ambas estão girando.

No brunimento convencional, no qual três processos mecânicos ocorrem simultaneamente na ferramenta durante cada ciclo, rotação, oscilação e avanço radial do abrasivo, existe a possibilidade da ferramenta ser afetada pelos perfis existentes no furo a ser

brunido (A BETTER WAY, 1986).

A capacidade de não ter que expandir e contrair as partes de corte da ferramenta durante cada ciclo, combinada com a característica de baixo desgaste dos superabrasivos, permite ao processo de passe único manter o máximo controle do tamanho do furo.

A parte frontal da ferramenta de passe único é projetada com uma quantidade adequada de conicidade que permite a ferramenta entrar guiada no furo pré-existente. Uma vez que a ferramenta entrou no furo, uma quantidade específica de material é subsequentemente removida ao longo do comprimento restante da ferramenta. Uma vez que este material é gradualmente removido pelas milhares de partículas de superabrasivo existentes por toda a periferia da ferramenta, muito pouco calor ou níveis de tensão são gerados, possibilitando, assim, um excelente controle da geometria do furo.

A figura 6.1 mostra um exemplo de ferramenta de brunir de passe único cujas características podem ser sumarizadas como (KOPP, 1986):

a – zona de corte cônica que realiza a maior parte da remoção de material. O comprimento e a conicidade do cone são escolhidos para se adequar ao material da peça, compensação do material, características específicas da peça e o acabamento superficial desejado;

b – zona de corte cilíndrica para calibração e acabamento. Esta região guia a ferramenta na peça e produz as dimensões finais do furo na peça.

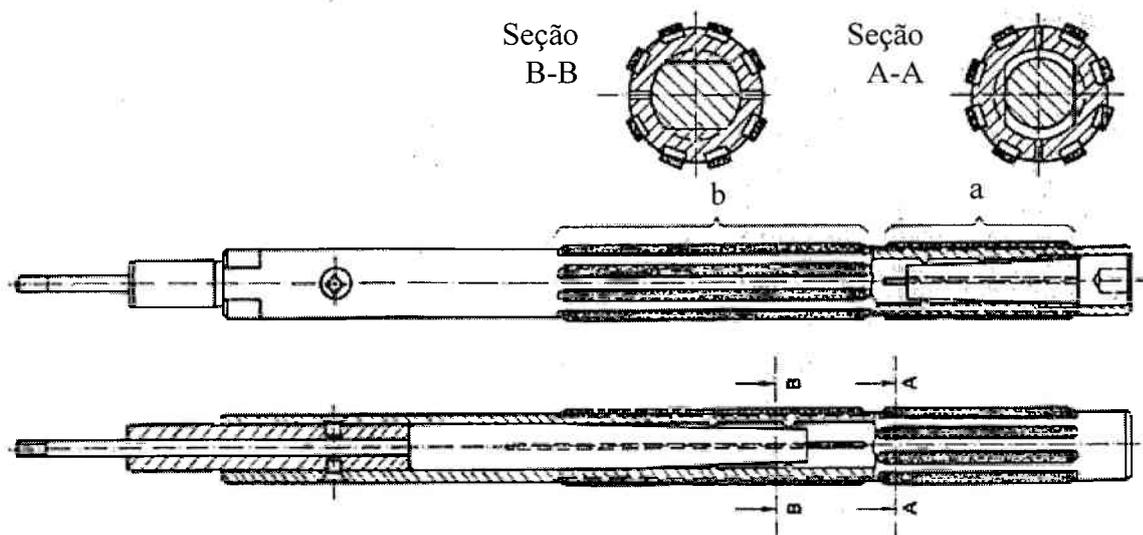


Figura 6.1 – Ferramenta de brunir de passe único (KOPP, 1986)

A remoção de material e o acabamento superficial alcançados estão diretamente relacionados ao tamanho da partícula abrasiva usada na ferramenta. Como exemplo, uma ferramenta com tamanho de grão MESH 100 pode remover até 0,076 mm de material no diâmetro em uma peça de ferro fundido e alcançar um acabamento superficial de R_a 2,0 μm . Inversamente, uma ferramenta com grão MESH 400 no mesmo material poderia promover um acabamento superficial mais fino mas seria capaz de remover no máximo até 0,025 mm de material no diâmetro do furo.

Este mesmo princípio também é válido no brunimento de outros materiais. Devido a esta característica, muitas aplicações necessitam de uma série de ferramentas do tipo passe único pré-ajustadas para serem usadas ou a ferramenta é gradualmente expandida dentro do seu limite de ajuste (MILLER, 1996). Estas aplicações são chamadas de operações multi-ferramentas ou multi-processos.

Com uma operação multi-ferramenta, cada ferramenta é ajustada para remover sua porção de material em quantidades sempre menores de acordo com a proximidade do tamanho final do furo. Assim, ferramentas de grãos mais grossos, para máxima remoção de material, e ferramentas de grão mais finos, para alcançar o acabamento superficial desejado, podem ser utilizadas em conjunto para uma maior eficiência do processo.

A figura 6.2 ilustra a utilização de três ferramentas na usinagem de ferro fundido em uma peça com um furo de diâmetro de 18 mm. Cada ferramenta possui um tamanho de grão de diamante que retira uma determinada quantidade de material e produz um determinado acabamento superficial (NAGEL, 1992).

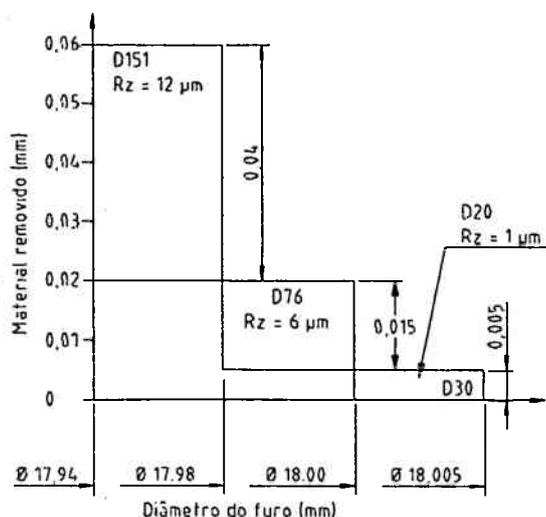


Figura 6.2 – Exemplo de utilização de ferramentas de brunir de passe único (NAGEL, 1996)

Para operações de brunimento que empregam várias ferramentas, existem máquinas especiais projetadas especialmente para o processo de passe único. Estas máquinas, como no brunimento convencional, podem apresentar configuração vertical ou horizontal, manual ou automática e com dois fusos ou mais.

Em alguns casos especiais as ferramentas de brunimento convencional podem ser utilizadas em conjunto com as ferramentas de brunimento de passe único, como relatado por FLORES, 1994b e KLINK, 1986, na usinagem de bielas de motores de automóveis. Para esta aplicação em particular é necessária a construção de máquina, fixação da peça e ferramentas especiais.

Como no brunimento convencional, também no brunimento de passe único deve ser permitido à ferramenta seguir a linha de centro do furo pré-existente através da flutuação da ferramenta ou da peça. Os métodos utilizados são os mesmos descritos no capítulo 5 e a sua determinação depende do tamanho, peso, forma e espessura da parede da peça.

ARUNACHALAN et al., 1997, descrevem em seu trabalho um experimento com o objetivo de analisar o efeito da fixação rígida da ferramenta e da peça sobre o erro de circularidade. Nesta situação qualquer desalinhamento entre o eixo da ferramenta e o eixo do furo da peça não pode ser corrigido, resultando em uma maior retirada de material em um dos lados do furo produzindo um furo com formato de um “8”, figura 6.3, confirmando que o erro de circularidade é grandemente afetado pela fixação rígida da ferramenta e peça.

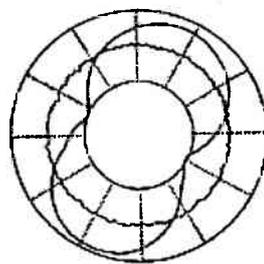


Figura 6.3 – Erro de circularidade do furo produzido sem a utilização de dispositivos flutuantes
(ARUNACHALAN et. al., 1997)

Atualmente são possíveis apenas pequenas remoções de material no diâmetro do furo, cerca de 10 a 30 μm , limitando o desalinhamento máximo entre o eixo do furo e da peça na faixa de 5 a 15 μm . Com a ferramenta e a peça rigidamente fixados é quase impossível obter tal alinhamento na prática.

Antes de sua utilização, para garantir a qualidade superficial exigida nos furos, as arestas dos grão de diamante ou CBN devem ser aparadas, de forma a haver um almejado aplainamento dos gumes. Esta operação na topografia do revestimento resulta no aumento dos raios de arredondamento dos grãos e, ao mesmo tempo, num aumento do número de grãos abrasivos expostos. Em consequência, é alcançada uma melhora na qualidade das superfícies usinadas (PERES, 1994).

Outro objetivo desta operação, também chamada de dressamento, é realizar o nivelamento dos grãos abrasivos depositados na superfície da ferramenta e retirar os grãos fracamente aderidos na camada abrasiva.

A operação de dressamento pode ser realizada com a ferramenta de brunir montada entre pontas em uma retífica cilíndrica e através da utilização de um rebolo de carboneto de silício, cujo tamanho de grão não pode exceder o tamanho do abrasivo da ferramenta, sendo a camada abrasiva retificada até atingir uma forma cilíndrica ao longo de todo seu comprimento. Outra forma de realizar o dressamento é fixando a ferramenta de brunir em uma brunidora manual e friccionando sua superfície, em rotação, contra dois segmentos de rebolo, ou uma lima diamantada.

Na figura 6.4 MILLER, 1996, demonstra o efeito do dressamento de camadas abrasivas, de diamante e CBN, de ferramentas de brunir utilizando diamante como abrasivo de desbaste. As fotos resultantes de exames provenientes de microscopia eletrônica mostram que a camada abrasiva de diamante sofreu muito pouco desgaste no dressamento enquanto que a camada de CBN foi desgastada em uma altura uniforme. A vista tangencial do horizonte da camada superficial curvada ilustra bem esta diferença.

O contorno da camada abrasiva e a geometria da ferramenta são fatores significantes na garantia do sucesso da operação de brunimento onde uma precisão geométrica de $0,5 \mu\text{m}$ pode ser alcançada (ARUNACHALAN, 1997).

O brunimento de furos cegos, antigamente considerado não-possível de ser realizado através do brunimento de passe único, é executado devido a recentes melhorias no projeto das ferramentas, fixação e máquinas. Para que o processo funcione de maneira adequada é necessário que a ferramenta possua um cone de entrada, que realiza o maior trabalho de retirada de material, extremamente pequeno, ocasionando a utilização de um maior número de ferramentas em relação ao brunimento de passe único passante (MARVIN, 1994).

Também, a localização do furo da peça em relação à linha de centro da ferramenta se torna mais crítica. Entretanto, mesmo com a melhor combinação ferramenta e fixação, se a

máquina usada não possui precisão e repetibilidade de posicionamento da ferramenta suficientes, o processo pode não funcionar. Uma máquina com programação CNC e avanço dos fusos controlado por servo motores são recomendados.

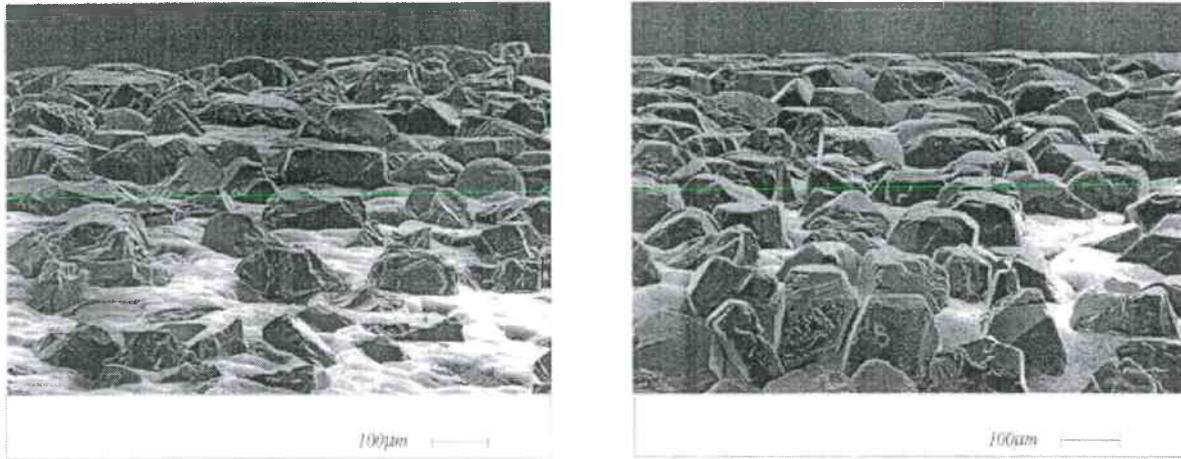


Figura 6.4 – Aparência das camadas abrasivas, diamante à esquerda e CBN à direita. Partículas de 149 µm de tamanho dressadas com diamante (MILLER, 1996)

6.1.1 Ferramentas tipo “Precidor”

As ferramentas tipo “Precidor” foram desenvolvidas pela empresa alemã Nagel para o brunimento de passe único em furos passantes. A ferramenta consiste de um mandril ajustável com uma camada de superabrasivo com zonas de corte e de guia, figura 6.5. De acordo com a necessidade, a camada abrasiva pode ser do tipo camada plena ou em forma de segmentos (NAGEL, 1987).

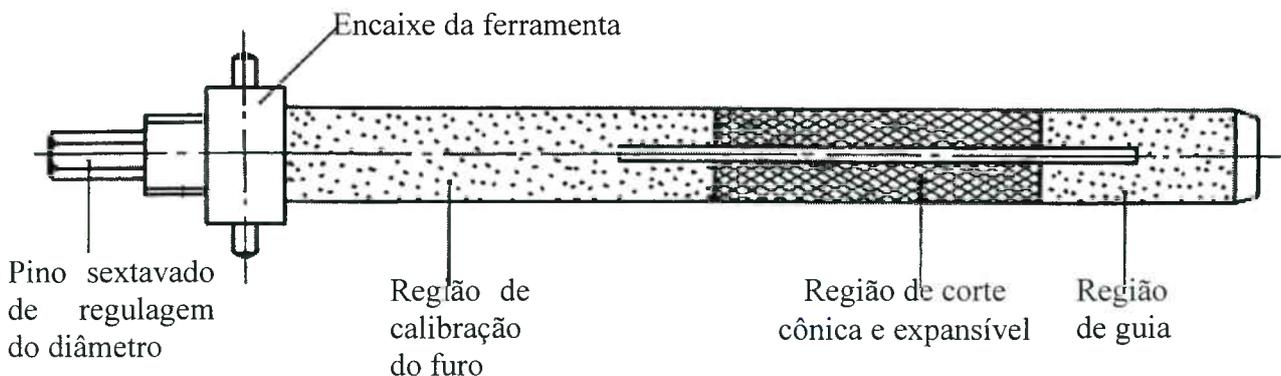


Figura 6.5 – Ferramenta “Precidor” (NAGEL, 1992)

Como ilustrado na figura 6.5, esta ferramenta apresenta três porções distintas, sendo a primeira formada por uma região de guia, a segunda por uma região cônica de corte e a última por uma região cilíndrica de calibração. A conicidade da região central realiza a retirada da maior parte do material do furo e compensa o desgaste provocado pelo trabalho forçado do avanço único. A expansão do diâmetro é realizada através de um elemento cônico na região de corte (PERES, 1994).

6.1.2 Ferramentas tipo bucha superabrasiva

MARVIN, 1997, fornece uma detalhada descrição das ferramentas tipo bucha superabrasiva. Segundo este autor, em geral, a ferramenta tipo bucha superabrasiva consiste de dois componentes principais: uma bucha cônica de ferro fundido ou aço e um mandril cônico.

A porção de corte, conhecida como bucha, é externamente precisamente retificada na forma de barril (cilíndrica no meio e cônica nas extremidades) e possui canais helicoidais por onde o fluido de corte escorre. Então a bucha é coberta com partículas superabrasivas depositadas eletroquimicamente. O tipo de ligante utilizado é chamado de eletro-depositado. Com o ligante eletro-depositado, uma única camada de superabrasivos é permanentemente fixada na superfície da bucha por uma matriz de níquel, permitindo que no mínimo 50% de cada partícula abrasiva permaneça exposta.

A conicidade da frente da bucha é projetada de modo que a ferramenta possa entrar no furo existente e seja inicialmente guiada. Uma vez que a ferramenta entra no furo, uma quantidade específica de material pode ser subsequenteemente removida ao longo do comprimento restante da ferramenta.

Para permitir o exato ajuste do diâmetro da ferramenta e possibilitar a compensação do desgaste do diamante, a bucha é construída com um furo cônico e uma abertura em hélice. O cone do furo da bucha é feito para encaixar em um mandril com a mesma conicidade externa. Com a bucha montada no mandril o diâmetro da ferramenta pode ser ajustado pelo deslocamento da bucha para cima ou para baixo sobre o mandril cônico.

Sobre o cone do mandril é depositada uma camada abrasiva, carboneto de silício de grão fino, por exemplo, que impede que a bucha escorregue sobre o mandril durante o brunimento. A faixa de ajuste do diâmetro do brunidor é de geralmente 50 a 60 μm . Acima disto a bucha pode ser permanentemente deformada (MILLER, 1996).

EKE et al., 1994, relatam, entre outros aprimoramentos no processo, as otimizações realizadas em ferramentas de passe único tipo bucha diamantada utilizadas no brunimento de

carcaças de válvulas hidráulicas destinadas a tratores. Entre as melhorias da ferramenta pode-se citar:

- a ferramenta teve seu comprimento aumentado para acomodar uma longa zona de entrada cônica e uma longa zona de calibração cilíndrica para obter uma melhor geometria do furo;

- construir amplos canais helicoidais de escoamento do fluido de corte para permitir que os cavacos possam deixar a área de corte;

- construir os canais do fluido de corte com hélice contrária ao sentido de rotação para dirigir os cavacos e o fluido para baixo, brunimento vertical, deixando rapidamente a área de corte;

- prover a ferramenta de alimentação interna do fluido de corte para auxiliar na evacuação dos cavacos e manter a máxima lubrificação e refrigeração onde é necessário.

- *Ajuste e condicionamento da ferramenta*

Após a operação de dressamento o ajuste da ferramenta é comumente realizado através do procedimento descrito a seguir (MARVIN, 1994):

- a – ajuste da ferramenta aproximadamente até o diâmetro desejado utilizando um micrômetro ou anel padrão;

- b – brunimento de uma peça com passe único e medir o diâmetro;

- c – expansão da ferramenta;

- d – repetição dos passos “b” e “c” quantas vezes necessário até que a ferramenta produza o furo de diâmetro desejado.

Uma vez o diâmetro da ferramenta ajustada, um período de “amaciamento” é necessário para as primeiras 100 peças aproximadamente. Durante este período, o diâmetro deve ser freqüentemente ajustado devido ao desgaste das arestas mais altas do superabrasivo.

- *Compensação do diâmetro*

Para satisfazer a grande variedade de aplicações, várias configurações de ferramentas podem ser utilizadas, cada uma caracterizada pela sua forma de ajuste. MARVIN, 1994, descreve alguns tipos e como e onde eles são utilizados:

- a – Mandril de peça única: para ajustar o diâmetro, a bucha superabrasiva, que possui um furo cônico e é aberto em hélice, deve ser fisicamente reposicionada sobre o mandril através do

uso de um martelo de latão. Este tipo de ferramenta é recomendado para ser usado somente quando os outros tipos não são adequados, como em furos de tamanho muito pequeno;

b – Mandril de ajuste frontal: neste tipo de ferramenta o diâmetro pode ser ajustado através de uma porca, que também serve de piloto, na frente da ferramenta. Cada volta da porca move a bucha sobre o mandril expandindo, dessa forma, o diâmetro em uma quantidade específica controlada;

c – Mandril de ajuste duplo: como na ferramenta anterior, o diâmetro pode ser ajustado através de uma porca frontal mas também pode ser diminuído através de uma porca de ajuste adicional localizada atrás da bucha superabrasiva;

d – Mandril de cone invertido: a conicidade do mandril é produzida na direção oposta das ferramentas citadas anteriormente (menor atrás e maior na frente). A bucha pode ser ajustada através de uma porca localizada atrás da bucha. Esta ferramenta é utilizada quando a folga atrás do furo a ser brunido é reduzida, como em aplicações em furos semi-cegos;

e – Mandril com auto-expansão: este tipo de ferramenta permite ajustar o diâmetro automaticamente quando necessário pela máquina sem a necessidade de parar a produção. Isto é possível através de uma conexão macho e fêmea entre a ferramenta e a máquina. A máquina pode ser comandada por um dispositivo de controle de diâmetro durante ou após o processo quando a compensação da ferramenta é necessária. A conexão hexagonal é rotacionada uma quantidade específica, a qual mecanicamente expande a zona de corte da ferramenta. Este tipo de ferramenta é utilizada em sistemas transfer de alta produção e necessita de máquinas especialmente projetadas para operar.

A figura 6.6 ilustra as ferramentas descritas acima e fabricadas pela empresa norte-americana Engis Corp. (MARVIN, 1994).

6.1.3 Dados práticos empregados no brunimento de curso longo de passe único

Os dados práticos referentes aos parâmetros de entrada variáveis foram selecionados das referências MARVIN, 1998; NAGEL, 1994; NAGEL, 1992; MILLER, 1996; ARUNACHALAN et al., 1997.

- Velocidade de corte

Dados práticos reportados por MARVIN, 1994 e 1998 variam de acordo com o material brunido e com as características específicas das peças usinadas.

Tabela 6.1 – Velocidades recomendadas para o brunimento de passe único

Material da peça	Velocidade periférica (m/min)	Velocidade axial (m/min)
Aço	64	1
Aço inox	54	0,31
Ferro fundido	20 – 25	0,4 – 0,8
Alumínio	48 – 63	24
Cerâmica	30 – 40	0,4 – 0,8



Figura 6.6 – Diferentes construções de ferramentas de brunir de passe único

NAGEL, 1992, recomenda, para o brunimento de ferro fundido, velocidades periféricas de 30 a 60 m/min e velocidades axiais entre 0,5 e 3,5 m/min. JUCHEM, 1986, por sua vez, recomenda velocidades periféricas entre 15 e 20 m/min e velocidades axiais entre 0,5 e 2 m/min para este mesmo material.

- Material removido

Como já mencionado anteriormente, a quantidade de material removido no diâmetro do furo depende do tamanho de grão empregado na ferramenta. Os dados mostrados na tabela abaixo são fornecidos por MARVIN, 1998 e NAGEL, 1992.

Tabela 6.2 – Remoção de material obtida no brunimento de passe único

Tamanho do grão		Remoção de material no diâmetro do furo (mm)				
		Ferro Fundido	Aço mole	Aço duro	Alumínio	Cerâmica
60	D250/B250	0,101	0,038	0,025	0,076	0,127
100	D151/B151	0,046	0,030	0,020	0,051	0,101
220	D76/B76	0,032	0,018	0,012	0,038	0,063
400	D45/B46	0,015	0,012	0,005	0,012	0,025
600	D30/B30	0,008	0,005	0,002	0,008	0,012

- Acabamento superficial

Assim como a quantidade de material removido, o acabamento superficial também depende do tamanho de grão empregado na ferramenta. Os dados mostrados na tabela abaixo são fornecidos por MARVIN, 1998 e NAGEL, 1992.

Tabela 6.3 – Rugosidades R_a e R_z obtidas com o brunimento de passe único

Tamanho do grão		Acabamento superficial R_a/R_z (μm)				
		Ferro Fundido	Aço mole	Aço duro	Alumínio	Cerâmica
60	D250/B250	3,00	3,00	1,20	1,50	3,00
100	D151/B151	1,50/8-12	1,50/8-12	0,60/4-7	0,80	1,50
220	D76/B76	0,80/5-8	0,80/5-8	0,30/2,5-4	0,40	0,80
400	D45/B46	0,40/3-5	0,40/3-5	0,15/1,5-3	0,20	0,40
600	D30/B30	0,25/2-4	0,30/1,5-3	0,10/1-2,5	0,15	0,30

Entretanto, deve-se ressaltar que a precisão dimensional e de erro de forma da ordem de 1 μm , possíveis de serem obtidas através do brunimento de passe único, somente são verificadas como resultado da usinagem de ferramentas de brunimento de acabamento, ou seja, ferramentas com grãos abrasivos de menor tamanho. Este fato é devido à dificuldade de medição de dimensões dessa ordem de grandeza em geometrias com alta rugosidade da superfície.

6.2 Brunimento com LASER

Este processo é um desenvolvimento da empresa alemã Gehring, que combina operações de brunimento com uma operação de abertura de sulcos na superfície do furo. A abertura dos sulcos é realizada com a intenção de formar uma textura superficial do tipo platô, que será estudada no capítulo seguinte, onde os ângulos de cruzamento, distância entre os sulcos, profundidade e largura possam ser muito bem controlados. Os sulcos produzidos na superfície através de raio LASER tem a função de armazenar óleo, muito importante em peças com movimento relativo, enquanto o restante da superfície serve como área de apoio ao componente montado no furo usinado.

PENCE, 1997, descreve o processo de brunimento com LASER através de quatro operações: brunimento de desbaste, brunimento de semi-acabamento, formação dos sulcos através de raio LASER e uma última operação de acabamento. Com o decorrer das operações a curva de material de suporte, t_p , toma a forma de uma curva característica de superfícies de platô, figura 6.7.

A figura 6.8 ilustra um exemplo de aplicação, cilindro de automóveis, em que o cabeçote LASER produziu ranhuras com passo de 1200 μm , profundidade de 5-8 μm , largura de 20-30 μm e ângulo de cruzamento, α , 30°. O cabeçote LASER varreu a superfície com uma velocidade periférica de 33 m/min e velocidade axial de 8,5 m/min. Como resultado obteve-se uma redução do consumo de óleo em motores a gasolina.

A figura 6.8 apresenta um esquema do aparato utilizado no exemplo acima. A figura 6.9, por sua vez ilustra a utilização do cabeçote LASER e as superfícies possíveis de se obter pelo processo.

Os fatores que influenciam a qualidade dos sulcos são a potência do laser, a frequência, o tamanho do foco, a velocidade de corte e a superfície e geometria do furo antes da operação com o raio LASER.

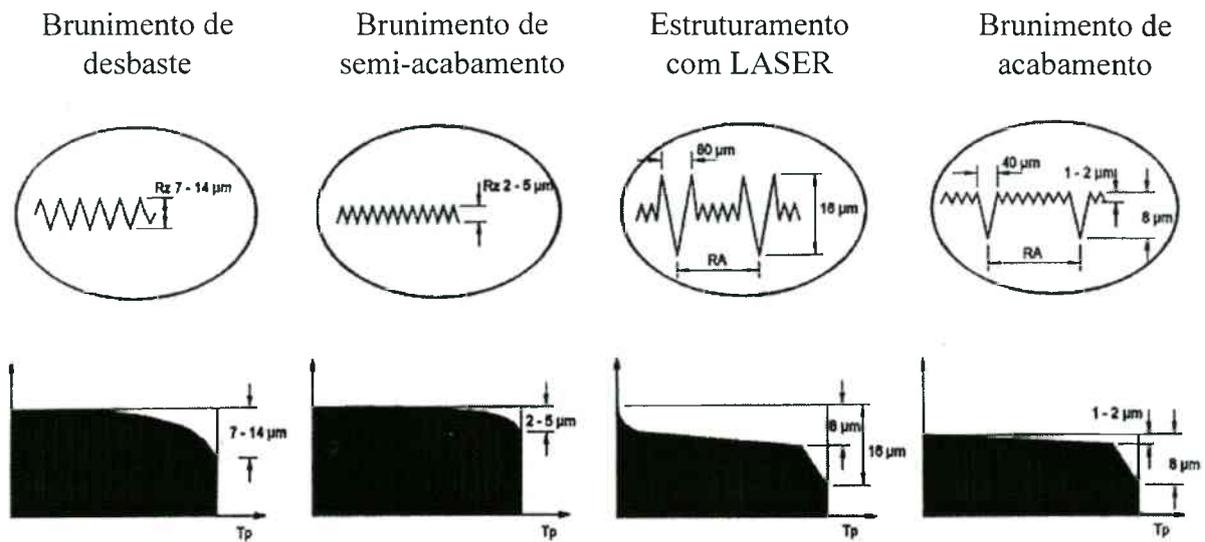


Figura 6.7 – Processo de brunimento com LASER (PENCKE, 1997)

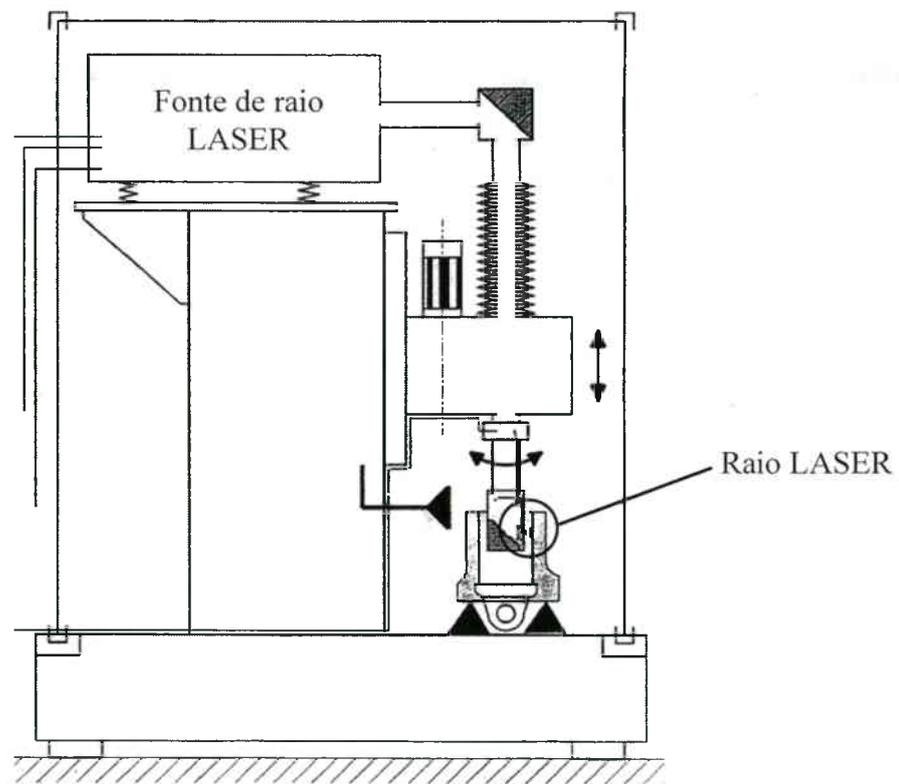


Figura 6.8 – Equipamento para brunimento com estruturação superficial com LASER (PENCKE, 1997)

6.3 Brunimento de alta frequência

O brunimento de alta frequência é uma combinação do brunimento de passe único e a tecnologia ultra-sônica. A cinemática do brunimento de passe único é superposta por uma oscilação de alta frequência sobre a ferramenta, produzida por um sistema ressonante e transdutor de quartzo piezelétrico (FLORES, 1994a e WESTKAMPER, 1994).

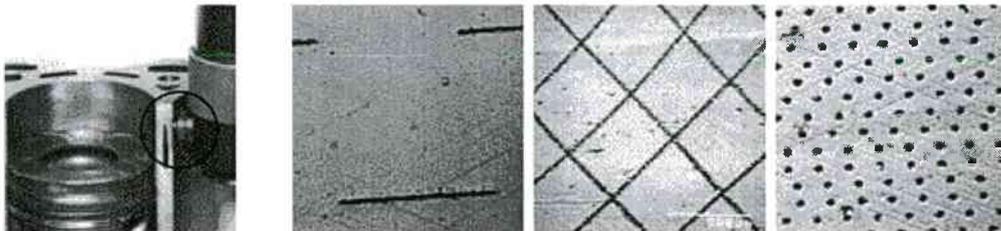


Figura 6.9 – Utilização do cabeçote LASER e superfícies obtidas pelo processo (PENCKE, 1997)

Nesta cinemática combinada, representada na figura 6.10, a componente de velocidade axial, v_a , é superposta pela oscilação axial com velocidade v_{us} . Dependendo do momento da direção da oscilação, v_{us} é positivo ou negativo. As diferenças entre a máxima e mínima velocidade de corte são pequenas, devido à desprezível contribuição da velocidade de oscilação (KOPP, 1995).

A velocidade de corte média pode ser calculada por:

$$v_c = \sqrt{(v_a + v_{us})^2 + v_r^2} \quad (6.1)$$

$$v_c = \sqrt{(v_a + 2.3,14.f.A)^2 + (D.3,14.n)^2} \quad (6.2)$$

onde: f – frequência de oscilação

A – amplitude da oscilação

D – diâmetro da ferramenta

n – rotação da ferramenta

O efeito positivo da oscilação ultra-sônica sobre o processo de corte é devido à mudança de direção de corte e à rápida aceleração das partículas abrasivas. Há também uma mudança no caminho desenvolvido pelas partículas abrasivas durante o curso da ferramenta na retirada de material. Enquanto o curso permanece sendo a distância percorrida pelo fuso na direção axial, há uma adição no comprimento do caminho percorrido pela partícula abrasiva devido ao movimento oscilatório de alta frequência. Isto permite que uma maior quantidade de material

seja retirada em um mesmo tempo quando comparado com o brunimento de passe único convencional (KOPP, 1995).

O brunimento de alta frequência somente pode ser aplicado em ferramentas de passe único. Os numerosos componentes das ferramentas de brunir convencionais não transmitem a oscilação de alta frequência ao abrasivo. Devido ao impulso oscilatório, o movimento relativo entre os componentes gera calor na ferramenta resultando em sua destruição através de fraturas por fadiga. Por esta razão ferramentas rígidas com abrasivo, diamante ou CBN eletro-depositado, são utilizadas (KOPP, 1995, FLORES, 1994).

Como a ferramenta é montada rigidamente no dispositivo que fornece a oscilação de alta frequência, a peça a ser brunida deve ser fixada em dispositivos flutuantes para permitir compensar o desvio de alinhamento entre as linhas de centro da ferramenta e do furo (WESTKAMPER et al., 1994).

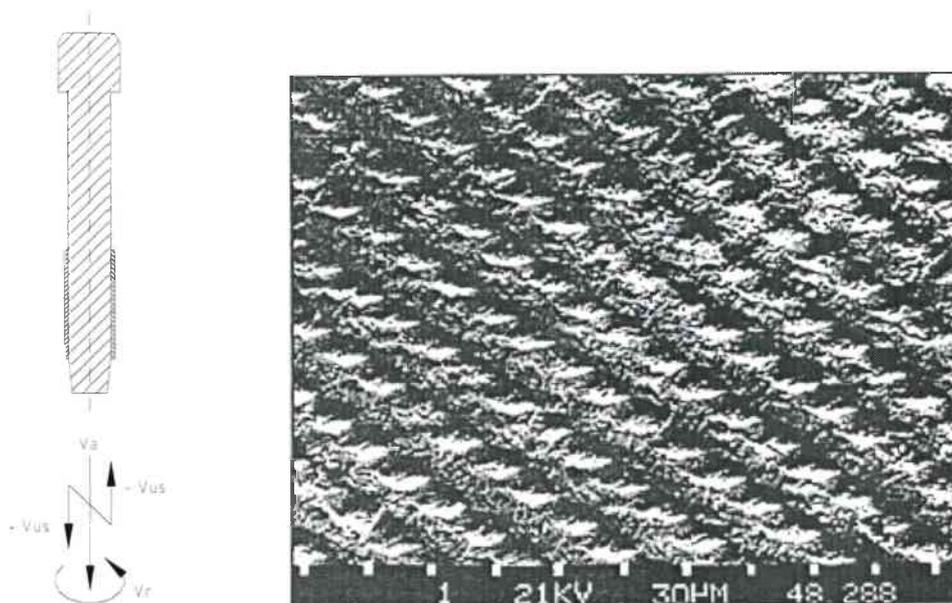


Figura 6.10 – Cinemática do brunimento de alta frequência e textura de superfície produzida pelo processo (WESTKAMPER, 1997)

KOPP, 1995, exemplifica uma aplicação prática em uma peça de aço com furo de 22,6 mm de diâmetro. Nesta peça foram utilizadas velocidade de corte, v_c , de 117 m/min com a componente velocidade axial, v_a , de 83 m/min e a componente periférica, v_r , de 85 m/min. A frequência, f , utilizada foi 22 kHz e a amplitude da oscilação, A , de 10 μm . A textura superficial obtida é mostrada na figura 6.10.

WESTKAMPER et al., 1994 e FLORES, 1994 reportam alguns resultados experimentais obtidos através do brunimento de alta frequência. Além do menor tempo de usinagem, proporcionado pelos altos valores de velocidade de corte atingidos, em comparação ao brunimento de passe único convencional, podem ser obtidas superfícies com perfis periódicos e pequenas tolerâncias de forma e dimensão.

Dependendo do tamanho de grão utilizado, podem ser removidas grandes quantidades de material enquanto que ao mesmo tempo são produzidos acabamentos superficiais melhores do que os alcançados pelo brunimento de passe único convencional. No exemplo de aplicação fornecido por KOPP, 1995, a ferramenta utilizada no brunimento da peça de aço era coberta com uma camada abrasiva de diamante com tamanho de grão D76 e níquel como ligante. O acabamento superficial obtido foi R_z 1,5 μm , o que em comparação com os valores descritos no item 6.1.3, R_z 5-8 μm , fornece uma idéia das capacidades do processo.

6.4 Brunimento de passe único externo

Este processo é um recente desenvolvimento da empresa norte-americana Engis Corp. para o acabamento externo, através do brunimento de passe único, de êmbolos de válvulas fabricados em cerâmica (MARVIN, 1994).

MARVIN, 1997, relata que o processo é muito similar ao brunimento de passe único de furos, com a diferença de que aqui a peça a ser brunida é fixada no fuso da máquina, através de uma fixação hidráulica, e a ferramenta diamantada é posicionada em uma fixação do tipo pendular na mesa da máquina.

A ferramenta é constituída de um cilindro de aço ou ferro fundido o qual possui um furo com a entrada e saída cônicos e uma região cilíndrica. A camada abrasiva é depositada na superfície do furo e realizará a retirada de material quando a peça cilíndrica, dotada de movimento de rotação e avanço axial, passar por este furo. O dispositivo pendular onde a ferramenta está fixada destina-se a permitir que o eixo da peça possa seguir o eixo da ferramenta.

Uma ou mais ferramentas podem ser utilizadas para que seja possível atingir o diâmetro e o acabamento superficial desejado da peça.

Visto que a peça deve ser fixada em um suporte, uma porção dela deve ser cortada. Peças que possuam um diâmetro interno que permita sua fixação através de um mandril interno expansível, podem ter todo seu comprimento acabado.

Experimentos realizados na peça descrita acima demonstram a possibilidade de obtenção de cilindros com um controle da medida do diâmetro melhor que 1 μm e erros de circularidade e

conicidade menores que 0,5 μm .

6.5 Máquinas CNC de brunimento

Segundo LIVERTON et. al., 1994, provavelmente devido à natureza especializada do processo de brunimento este foi um dos últimos processos de usinagem tradicionais a ser beneficiado pelo controle computadorizado.

Como já mencionado anteriormente, o brunimento convencional é governado por três movimentos simultâneos: rotação, avanço axial e avanço radial das pedras abrasivas. Estes três movimentos podem ser controlados pelo comando CNC da máquina.

O controle CNC pode proporcionar a seleção correta da velocidade periférica para cada tipo de abrasivo e ligante. As subrotinas programadas para o brunimento podem incluir cursos curtos, onde necessário, com movimentos variando no comprimento, duração e frequência. Peças com finas paredes, que podem sofrer distorções devido à força de brunimento, podem receber ciclos de brunimento de pequenos cursos localizados com uma menor força de avanço (LIVERTON et. al., 1994, NOAKER, 1995).

Os ciclos de avanço radial das pedras abrasivas podem ser realizados das seguintes maneiras:

- avanço convencional com rápida aproximação para que as pedras abrasivas entrem em contato com a superfície do furo, seguido por um avanço radial incremental;
- avanço escalonado, incluindo aproximação rápida, avanço de desbaste, avanço de acabamento e faiscamento até o diâmetro final ser atingido;
- avanço seletivo onde um pulso de avanço, ajustado em um determinado incremento, pode ser programado para qualquer ponto dentro do furo ;
- controle de avanço adaptativo onde o avanço é ajustado para manter uma dimensão desejada de acordo com o comando de um sistema de medição durante o processo.

A medição durante o processo que utiliza jatos de ar que saem do corpo da ferramenta e realizam a medição do furo dinamicamente durante o processo, como a descrita por LIN, 1994, pode facilitar o controle adaptativo.

No brunimento de passe único as máquinas CNC também trazem vantagens ao processo, de acordo com ENGIS, 1994 e SUNNEN, 1993:

- velocidades, avanços e cursos podem ser controlados individualmente, em máquinas com construção modular, para a otimização do tempo do ciclo, vida da ferramenta, acabamento do furo e geometria do furo;

- rápida preparação devido a não ser necessário o ajuste de controladores de fim de curso em cada mudança de tipo de peça a ser brunida;

6.6 Brunimento por extrusão

O brunimento por extrusão, também chamado de usinagem por escoamento abrasivo (“Abrasive Flow Machining”, AFM), foi desenvolvido pela empresa norte-americana Extrude Hone como um método para rebarbar, polir e criar raios em superfícies com difícil acesso através do escoamento de um meio abrasivo semi-sólido, de consistência plástica (EXTRUDEHONE, 1999).

O meio abrasivo, devido à sua consistência semi-sólida, toma a forma da superfície interna a ser brunida enquanto a máquina controla a pressão de extrusão do abrasivo, a sua velocidade de escoamento e volume escoado. Visto que a ação do abrasivo tende a ocorrer preferencialmente nas áreas onde o fluxo é mais restrito, devem ser utilizados dispositivos para direcionar o abrasivo.

Uma variedade de acabamentos podem ser obtidos com diferentes tipos e tamanhos de grão, concentrações do abrasivo e viscosidades do meio.

A figura 6.11 ilustra o processo de brunimento por extrusão.

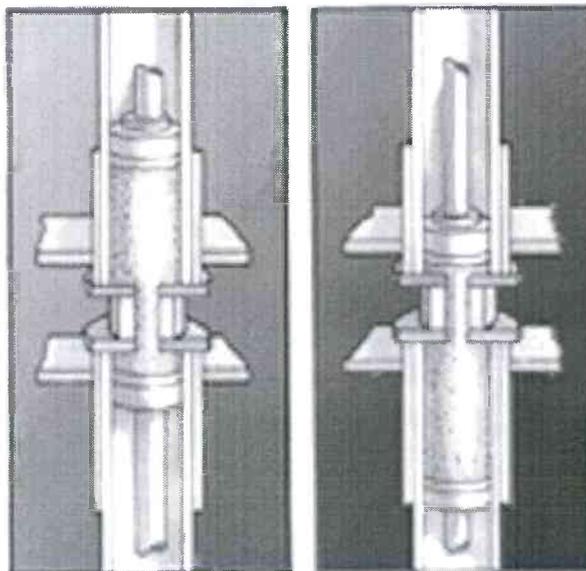


Figura 6.11 – Brunimento por extrusão (EXTRUDEHONE, 1999)

CAPÍTULO 7

TEXTURA E INTEGRIDADE EM SUPERFÍCIES BRUNIDAS

O estudo da superfície pode ser dividido em duas partes distintas, que são a textura e a integridade da superfície. A figura 7.1 ilustra as diferenças entre a textura de superfície, que estuda os efeitos externos produzidos pelo processo de usinagem, e a integridade de superfície, que trata dos efeitos internos (BOEHS, 1992).

A superfície de uma peça pode ser dividida em duas camadas limites distintas, a externa e a interna, figura 7.1. A camada limite interna da superfície é resultante da ação mecânica da usinagem e sua profundidade depende da severidade da usinagem a que foi submetida. Por sua vez, a camada limite externa encontra-se entre a atmosfera externa e a estrutura atômica do material.

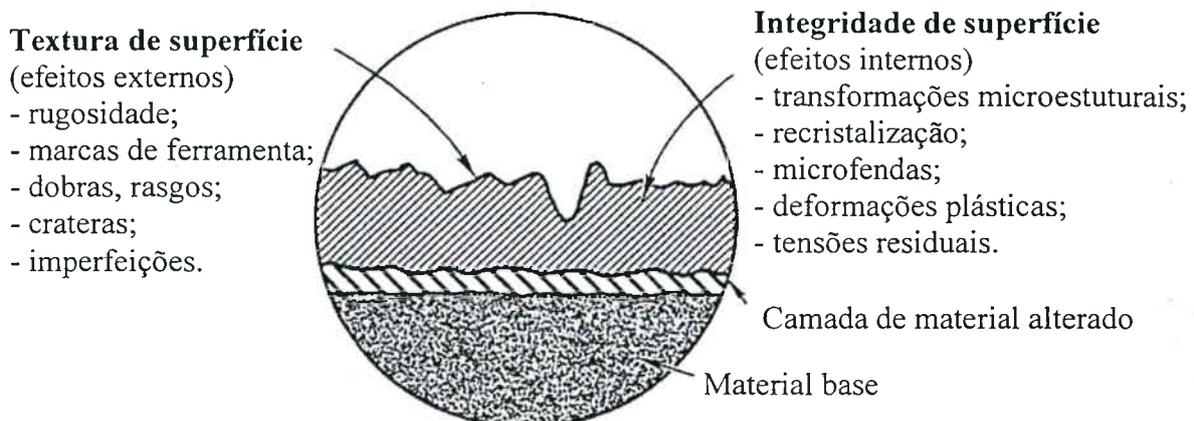


Figura 7.1 – Textura e integridade de superfície

A avaliação de uma superfície pode ser realizada através de sua análise e de sua medição. A análise é a determinação de propriedades ou características previamente definidas efetuada, principalmente, através da inspeção visual. A medição é a determinação numérica de uma grandeza comparada com uma grandeza de referência (BOEHS, 1992 e DIN 4775, 1982).

7.1 Textura da superfície brunida

A textura de superfície produzida por operações de usinagem é geralmente irregular e

complexa e pode ser avaliada através da inspeção visual, frequentemente auxiliada pela medição que utiliza conjuntos de padrões de rugosidade (BOEHS, 1992).

Textura de superfície são os desvios repetitivos ou aleatórios da superfície ideal que formam a topografia tridimensional da superfície. Para medir estes desvios existe uma variedade de dispositivos mecânicos, eletrônicos e óticos que realizam uma amostragem do perfil da superfície.

Quatro elementos compõe a textura da superfície:

- **rugosidade:** irregularidades mais finas que resultam da ação do processo de usinagem, como as marcas de avanço da ferramenta, e outras irregularidades dentro do comprimento de amostra;

- **ondulação:** inclui todas as irregularidades cujo espaçamento é maior que o comprimento de amostragem de rugosidade resultantes de vibrações, desgaste da ferramenta, tratamento térmico, etc. A rugosidade pode ser considerada superposta numa ondulação e sua medição pode ser realizada através de filtros eletrônicos que a separam da ondulação, figura 7.2 (BOEHS, 1992);

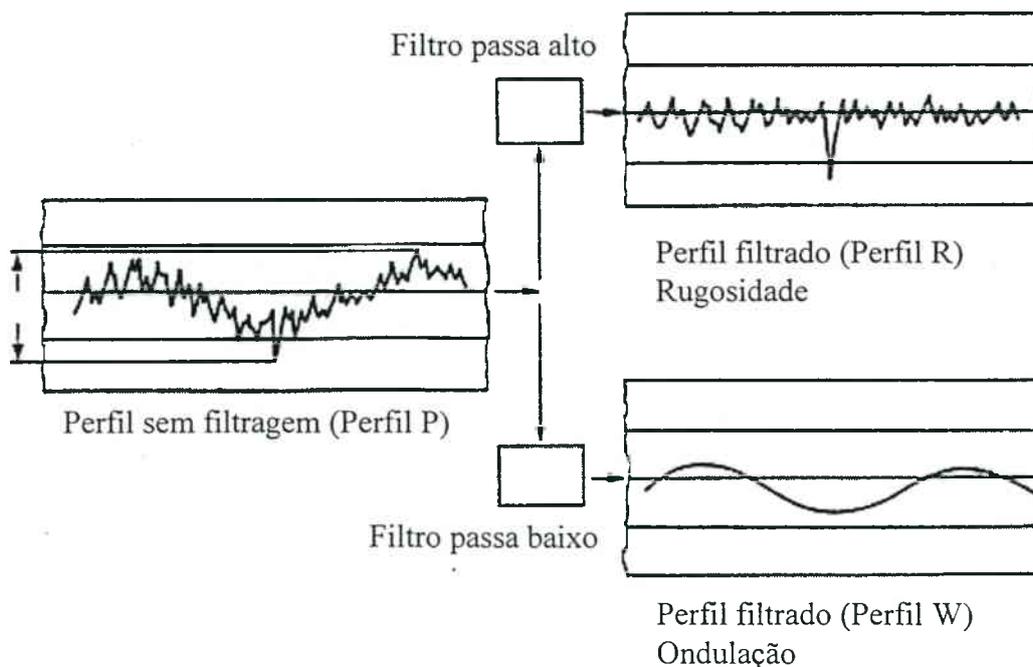


Figura 7.2 – Filtragem do perfil de rugosidade separando a rugosidade da ondulação (OPTICAL, 1989)

- **marcas:** são as direções do padrão predominante da superfície, ordinariamente

determinadas pelo método de produção empregado;

- **falhas:** são irregularidades não-intencionais como trincas, crateras, inclusões, arranhões, etc.

7.1.1 Medição da textura de superfícies brunidas

A medição da textura da superfície é geralmente realizada sobre o perfil de rugosidade da superfície.

Tradicionalmente, o principal objetivo da especificação e medição da textura da superfície era monitorar a estabilidade do processo de fabricação. Para isto são utilizados parâmetros de uso comum como R_a e R_q . Entretanto a necessidade de entendimento das características funcionais da superfície (desgaste, fricção, lubrificação, etc.), combinados com melhorias tecnológicas nos equipamentos de medição, permitiu o desenvolvimento de novos parâmetros para exercer controle sobre essas características (TABENKIN, 1997).

Para a medição da rugosidade da superfície os instrumentos mais utilizados são os de medição por contato, através de uma agulha apalpadora, e os de medição sem contato, ou sonda ótica, que empregam feixes de raio laser.

- Instrumentos de medição de rugosidade de superfícies

Instrumentos de medição por contato empregam uma agulha apalpadora de diamante que é pressionada contra a superfície enquanto percorre um determinado intervalo. Um sistema de medição indutivo converte o sinal elétrico, que é tratado e alimenta um indicador analógico ou digital (OPTICAL, 1989).

A agulha apalpadora é cônica, geralmente com ângulo de 90° , e possui a ponta arredondada, com raios de $5 \mu\text{m}$ ou $10 \mu\text{m}$. O sistema de apalpação pode ser com uma superfície de referência ou com patim. No primeiro a agulha é conduzida por um braço que utiliza uma superfície de referência externa à peça a ser medida enquanto que no segundo o patim se apoia sobre a superfície da peça a ser medida. Estes sistemas estão ilustrados na figura 7.3 (BOEHS, 1992).

O sistema de apalpação com patim e o raio da agulha de diamante podem influenciar no valor do parâmetro e no perfil da rugosidade da superfície medida, figura 7.4.

Os instrumentos de medição sem contato, ou sonda ótica, empregam um feixe de luz monocromática dirigido que atinge a superfície da peça a uma determinada distância focal e é refletido por ela. Ao retornar o feixe luminoso atinge um sensor que envia um sinal ao

comparador que, por sua vez, compara o sinal medido com o de referência (OPTICAL, 1989).

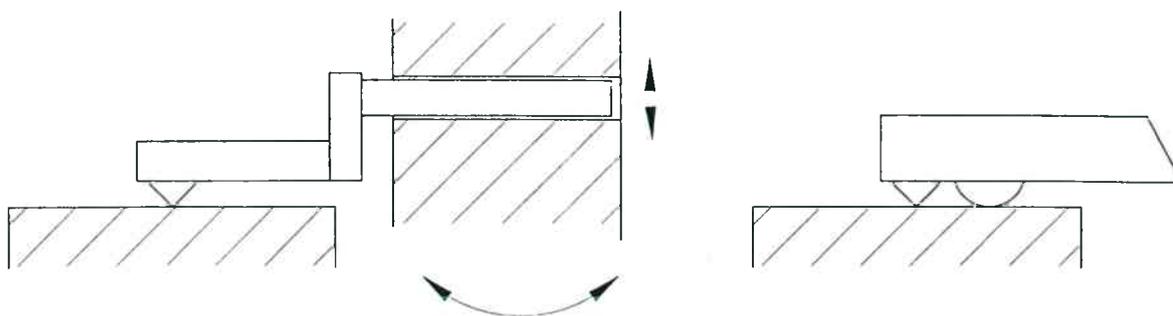


Figura 7.3 – Sistemas de apalpação com superfície de referência e com patim (OPTICAL, 1989)

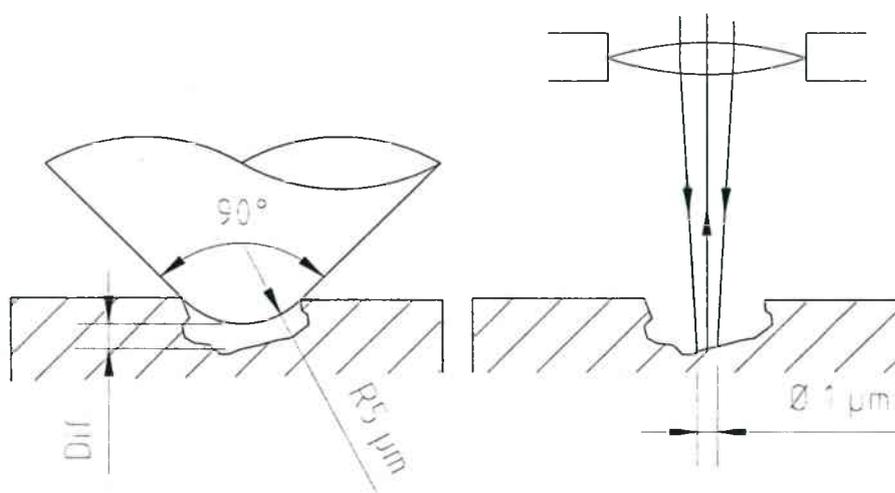


Figura 7.4 – Influência do raio da agulha apalpadora e do diâmetro do feixe LASER (OPTICAL, 1989)

Um motor translativo realiza o ajuste contínuo do braço de medição de modo a manter a distância focal. Assim, o braço de medição acompanha o perfil da superfície da peça. Um transdutor indutivo converte o movimento do braço em um sinal elétrico que é tratado e convertido em valor numérico.

Devido ao diâmetro do feixe laser ser consideravelmente menor do que o raio do apalpador mecânico, algumas imperfeições não medidas pela ponta de diamante podem ser obtidas pela sonda ótica, figura 7.4.

- Parâmetros utilizados na medição de rugosidade de superfícies brunidas

Como resultado do desenvolvimento científico em anos recentes, existem mais de 100 parâmetros diferentes para serem escolhidos, além de diferentes filtros, comprimentos amostrais e outras variáveis (TABENKIN, 1997).

KOELSCH, 1994b, afirma que embora o parâmetro R_a seja o mais popular e utilizado na prática, um mesmo valor de rugosidade R_a pode descrever superfícies totalmente diferentes, como exemplificado na figura 7.5 (DIN 4776, 1990). Entretanto, este parâmetro não é o único com limitações sendo que nenhum dos parâmetros conhecidos é adequado para todas as aplicações.

Além do valor do parâmetro medido é importante a obtenção e análise do perfil da superfície, figura 6.5, quando o instrumento de medição tem condições de fornecê-lo.

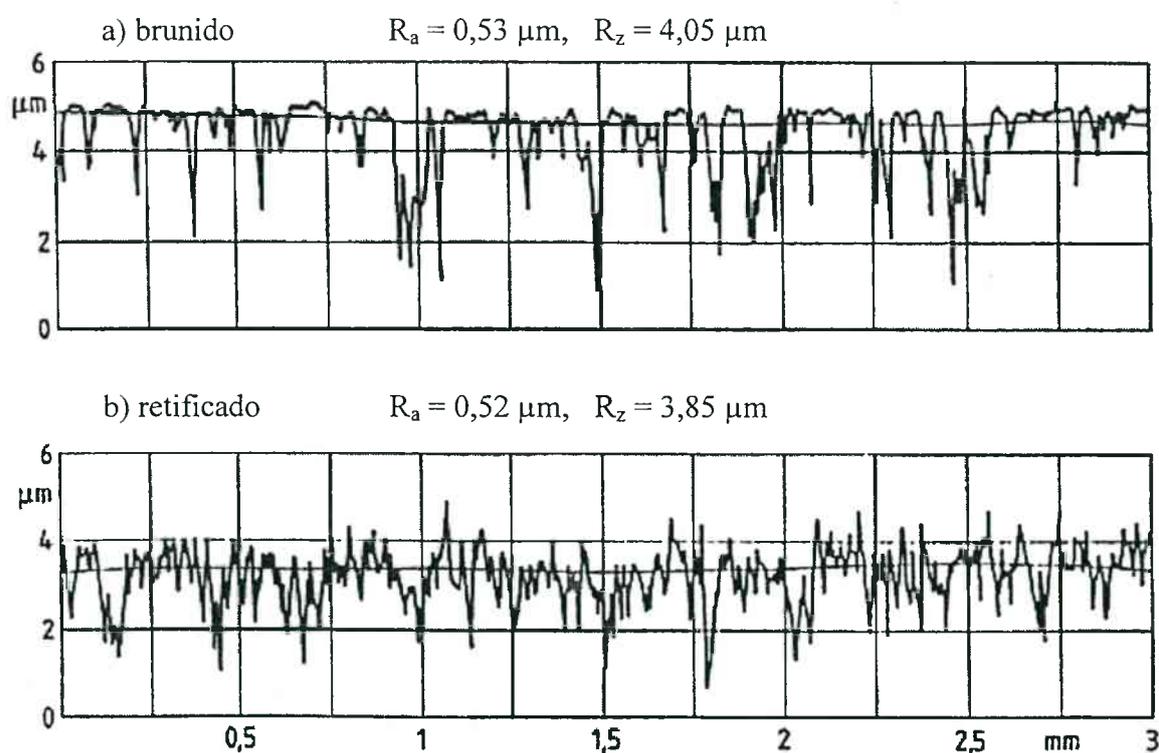


Figura 7.5 – Medição de rugosidade de superfície brunida (a) e retificada (b) com valores semelhantes e perfis diferentes (DIN 4776, 1990)

Segundo KOELSCH, 1994b, para uma adequada descrição de uma superfície os parâmetros que devem ser utilizados recaem em três grupos:

- Parâmetros de amplitude, que refletem as variações na altura do perfil e incluem a rugosidade média, a geometria média, a altura de pico a vale, a altura do perfil, inclinação e altura de dez pontos;

- Parâmetros de espaçamento, que são sensíveis às variações no perfil do comprimento da ondulação;

- Parâmetros híbridos, que são sensíveis à variações na altura do perfil bem como no comprimento da ondulação.

Como já mencionado no capítulo 6, o acabamento da superfície é diretamente dependente do tamanho do grão do abrasivo utilizado. Uma textura de superfície especial produzida pelo brunimento é a de “plateau”, ou de platô.

No brunimento de platô a superfície é gerada através de dois processos. O primeiro é um processo de brunimento de desbaste, ou de base, onde são utilizados grandes tamanhos de grão abrasivos. O segundo processo é o processo de acabamento, ou de formação do platô, com a utilização de pequenos tamanhos de grãos abrasivos. A operação de brunimento de formação do platô desgasta os picos deixados pelo brunimento de desgaste conservando, entretanto, os vales formados nesta operação (MALBURG et al., 1993). A figura 7.6 ilustra a formação de uma superfície platafórmica.

A superfície resultante proporciona uma boa área de suporte de carga conjuntamente com uma boa capacidade de retenção de óleo lubrificante. Tais requisitos são grandemente desejados para a aplicação desta textura em superfícies de deslizamento lubrificadas.

Os processos de brunimento convencional e de passe único possuem capacidade para produzirem superfícies platafórmicas. A maioria dos parâmetros desenvolvidos tem o objetivo de caracterizar superfícies formadas processos de fabricação simples. Devido ao fato do brunimento de platô gerar superfícies resultantes de múltiplos processos, como os descritos no item 6.1, um bom número de parâmetros tem sido propostos para tentar descrever este tipo de superfície (SANNAREDDY et al., 1998).

Uma metodologia comum para a caracterização da superfície de platô é a utilização dos parâmetros da família R_k , especificados pela DIN 4776 (MALBURG et al., 1993).

Cinco parâmetros são definidos na DIN 4776. Eles estão relacionados com o perfil da curva de taxa de suporte, ou curva de Abbot, ilustrada na figura 7.7. O principal parâmetro do grupo, visto que os outros parâmetros dependem de sua determinação, é o R_k . O valor de R_k é definido como sendo a porção central da banda de rugosidade, as amplitudes da rugosidade

acima e abaixo desta banda são caracterizadas pelo R_{pk} e R_{vk} , altura média de pico reduzida e profundidade de vale, respectivamente (DIN 4776,1990 e KING et al., 1995).

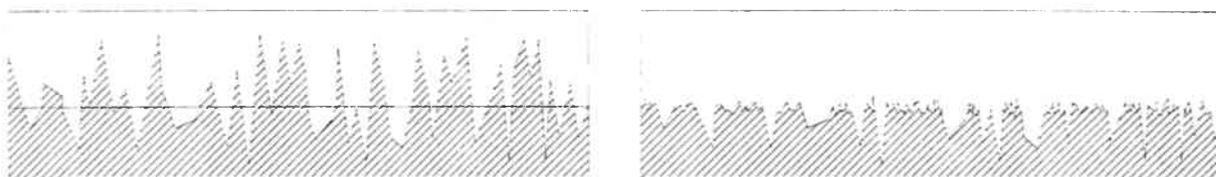


Figura 7.6 – Geração de uma superfície platafórmica: brunimento de desbaste (esquerda) e brunimento de acabamento (direita)

Em superfícies platafórmicas pequenos valores de R_{pk} , indicando grande capacidade de suporte, e grandes valores de R_{vk} , que indica a capacidade de retenção de lubrificante, são típicos. M_{r1} e M_{r2} são as porcentagens na qual ocorre a transição entre as região de vales, central e de picos.

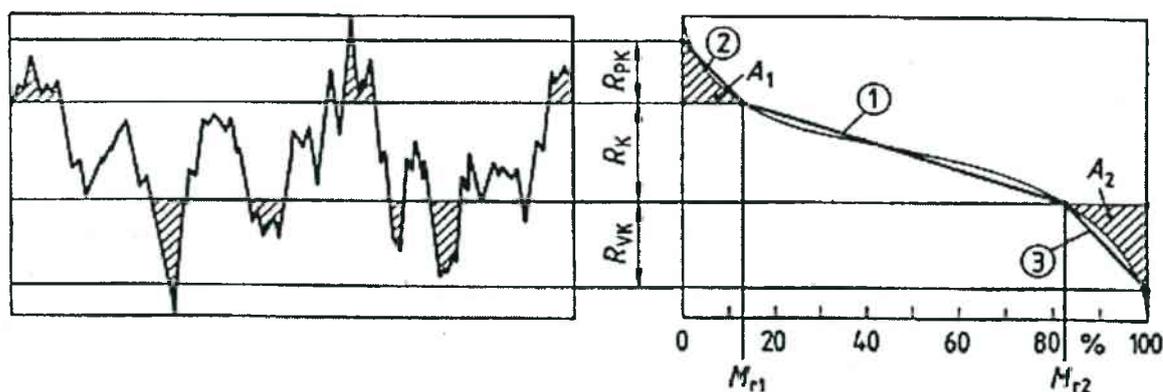


Figura 7.7 – Definição dos parâmetros Rk (DIN 4776, 1990).

A aplicação de superfícies platafórmicas e a definição dos parâmetros mais adequados para descrevê-las voltados para o uso destas superfícies em cilindros de motores de combustão interna foi muito estudada por Pawlus e Michalski nos trabalhos relacionados na bibliografia MICHALSKI et al., 1992, MICHALSKI et al., 1993, MICHALSKI et al., 1994, PAWLUS, 1994 e PAWLUS, 1996.

Para a análise da rugosidade de superfícies de cilindros brunidos estes pesquisadores selecionaram quatro parâmetros, cuja interpretação gráfica pode ser vista na figura 7.8:

- coeficiente de vazio R_p/R_t ; parâmetro mais importante que pode ser considerado como uma medida do vazio do perfil (área não-hachurada na figura 7.8a). Pode ser presumido que o valor de desgaste linear do cilindro seja proporcional ao coeficiente de vazio;

- profundidade central normalizada R_k/R_t ;
- um parâmetro de altura R_{tm} ou R_{3y} ;
- distância média entre os vales profundos OR.

Uma descrição mais detalhada poderia incluir os parâmetros:

- capacidade real de armazenagem de óleo V_{OR} (mm^3/cm^2);
- um parâmetro horizontal SR ou Sm.

7.1.2 Análise da textura de superfícies brunidas

Um método aprovado de investigar a microtextura de superfícies brunidas é percorrer sua topografia com um apalpador, mecânico ou ótico, ao longo de uma linha reta (BEYERER et al., 1997), como descrito no item 7.1.1.

Os parâmetros de acabamento superficial, cujos valores são obtidos por instrumentos deste tipo, são falhos na sua caracterização da superfície. Eles são representações bidimensionais da superfície. A tribologia, ciência que estuda as propriedades de fricção, desgaste e lubrificação de cada superfície é baseada em características superficiais tridimensionais. Todas estas propriedades envolvem a interação de duas superfícies tridimensionais. Uma simples leitura de um perfil, independentemente do parâmetro utilizado, não pode fornecer informações necessárias para avaliar a superfície (SOLAROLI et al., 1997).

SOLAROLI et al., 1997, indicam o uso da microscopia eletrônica de varredura como uma ferramenta auxiliar no entendimento das propriedades das superfícies brunidas. Uma pessoa experimentada deve avaliar as imagens obtidas para qualificar a textura da superfície.

Já BEYERER et al., 1997, realizaram estudos visando a inspeção das superfícies brunidas através de câmaras de vídeo equipadas com um sistema ótico de aumento. Para que a detecção de defeitos seja realizada de modo automático, eliminando o tedioso trabalho de exame visual da imagem da superfície, as imagens em nível cinza são tratadas por algoritmos de processamento de imagens. Estes algoritmos filtram as imagens separando os sulcos produzidos pelo brunimento da textura de fundo, onde estão “escondidos” os defeitos.

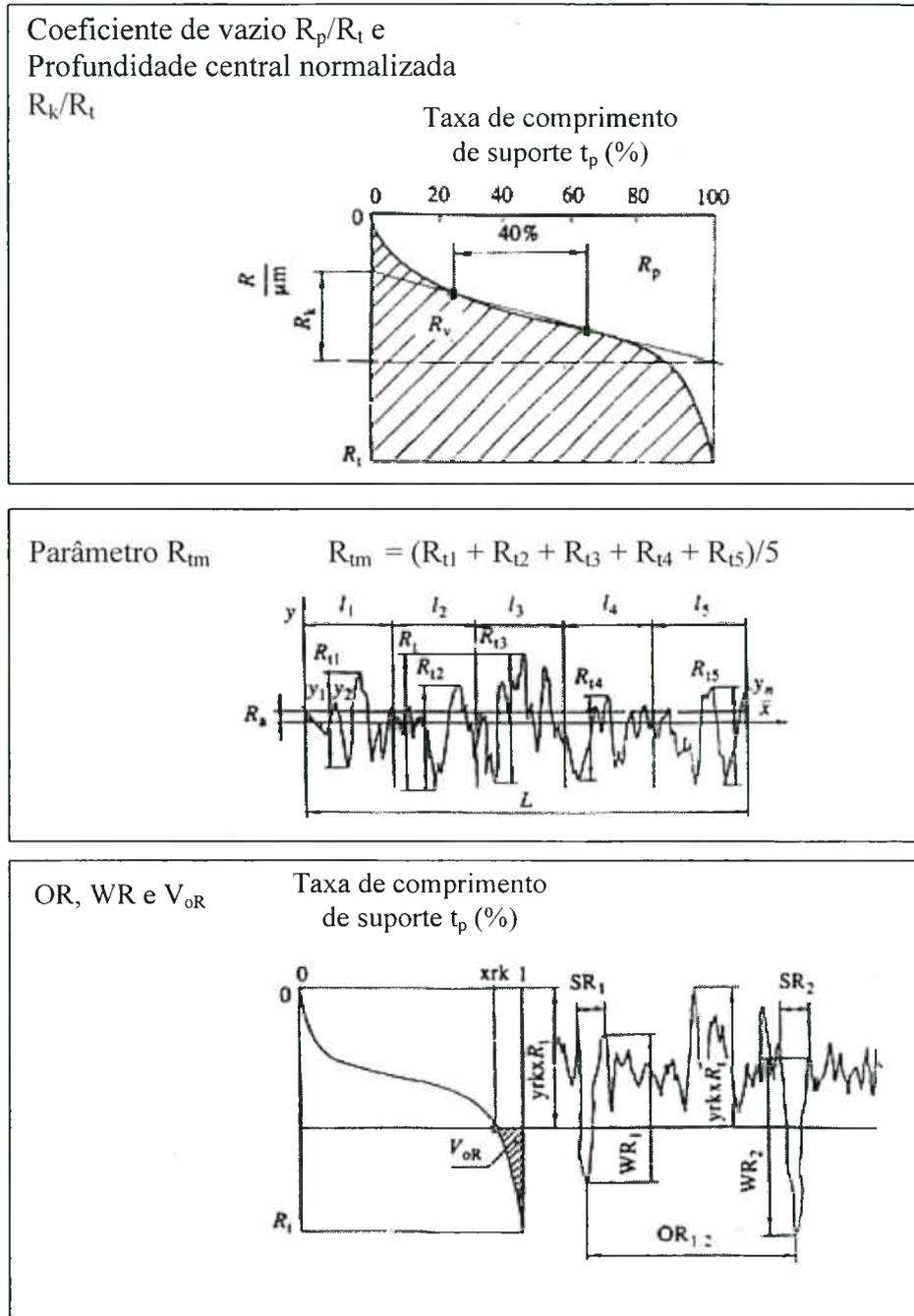


Figura 7.8 – Interpretação gráfica dos parâmetros de rugosidade para descrição de superfícies de cilindros de motores de combustão interna, segundo PAWLUS, 1996

A chamada textura de fundo consiste de poros, trincas, escamas, defeitos do material, grafite lamelar, manchas de gordura, metal dobrado, sulcos interrompidos, arestas dos sulcos sujas e corpos estranhos.

Conforme descrito no item 5.2.1, o brunimento convencional proporciona uma textura de

superfície que apresenta sulcos cruzados, cujo ângulo de cruzamento depende da composição das velocidades periférica e axial.

No brunimento de passe único, entretanto, como a ferramenta realiza a retirada de material em apenas uma passagem pelo furo da peça o ângulo de cruzamento não é tão visível. No retorno da ferramenta muito poucos grãos realizam a retirada de material, provocando mais um efeito de alisamento do que de corte.

A figura 7.9 representa a diferença das texturas produzidas no brunimento convencional e de passe único (HAASIS, 1993).

Um recente desenvolvimento, relatado por MARVIN, 1998, diz respeito à obtenção de texturas de superfície com sulcos cruzados, que é uma textura desejada em cilindros de motores de combustão interna.

Esta textura é alcançada através do uso de um avanço axial maior do que o normal, o que remove apenas uma porção do material, e então realizar a oscilação da ferramenta através do furo em um determinado número de vezes com velocidade periférica e avanço axial ajustados. A velocidade periférica e o avanço determinarão o ângulo de cruzamento dos sulcos. A ferramenta de passe único é especialmente projetada para esta aplicação.

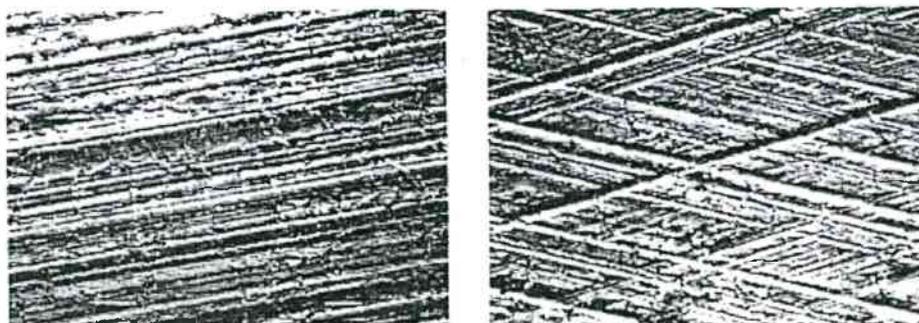


Figura 7.9 – Textura de superfície produzida pelo processo de brunimento convencional (direita) e de passe único (esquerda)

Uma característica não desejada é a remoção das partículas de carbono presentes na estrutura do ferro fundido. A remoção destas partículas, observadas por BRM, 1987, JUCHEM, 1986 e BALINSKIJ, 1991, causa uma cavidade na superfície cujas bordas são esmagadas e arrancadas deixando um grande buraco. Este efeito indesejável é chamado de dobramento do metal (metal folding).

Quando são utilizadas grandes pressões sobre a pedra abrasiva de brunimento, visando

uma maior taxa de remoção de material, são produzidos sulcos maiores do que o necessário causando o arrancamento do material e o dobramento dos picos.

As fotografias a seguir, figura 7.10, foram apresentadas e discutidas por BRM, 1986. Elas são provenientes das paredes de cilindros de motores de combustão interna, fabricados em ferro fundido, e servem como exemplo de uma análise visual da textura de superfícies produzidas por brunimento.

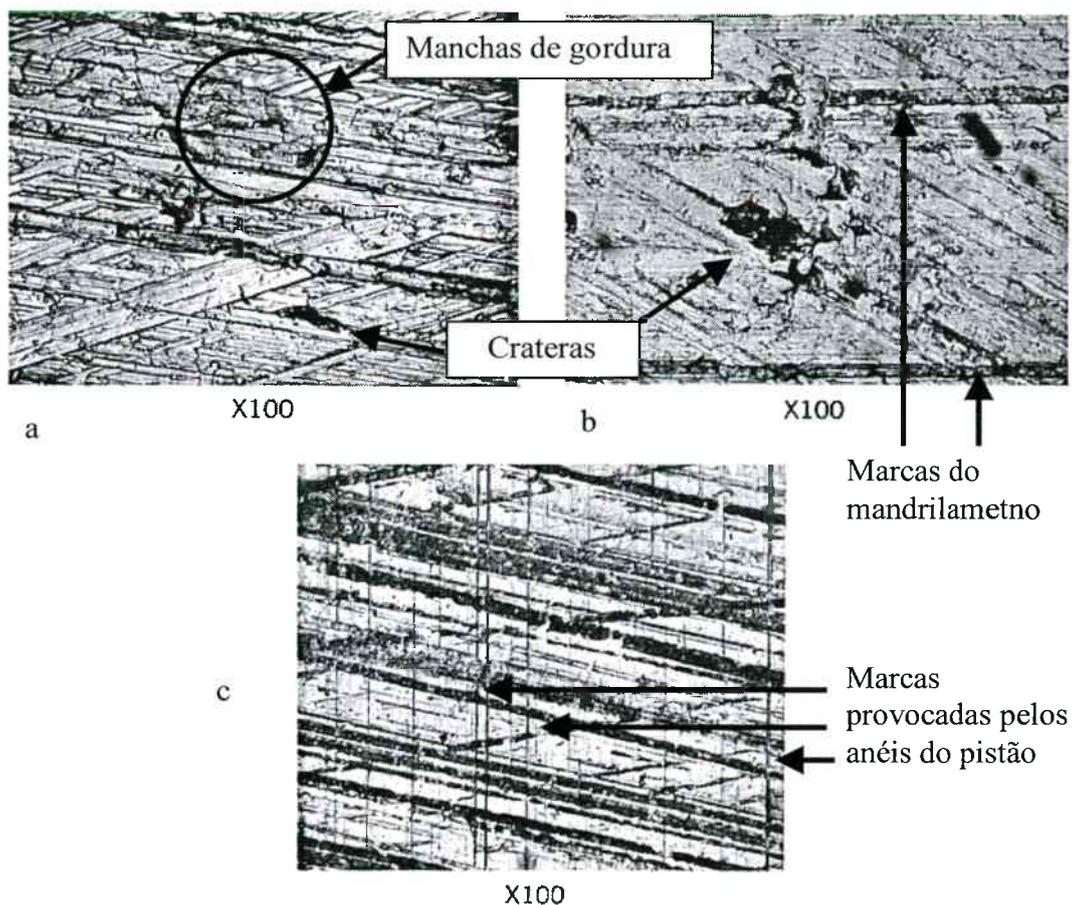


Figura 7.10 – Textura superficial de superfícies brunidas evidenciando defeitos superficiais e marcas de desgaste (BRM, 1986)

Na fotografia 7.10a pode ser visto o material manchado com gordura e lugares onde as partículas de grafite foram arrancadas, deixando buracos na superfície, nos quais fragmentos podem se alojar. A fotografia 7.10b apresenta marcas remanescentes da operação anterior ao brunimento, mandrilamento, que não foram removidas. Finalmente, a fotografia 7.10c ilustra a parede de um cilindro de motor usado onde pode ser notado que os pistões do motor ao passarem pelos picos da superfície arrastaram material, deixando profundas marcas.

7.2 Integridade da superfície brunida

Para realizar a avaliação da integridade superficial de uma peça, deve-se levar em consideração aspectos como a microestrutura e tensões residuais, entre outros. Para avaliar as tensões residuais podem ser empregadas técnicas de remoção de camadas ou avaliação por difração de raios-X. O estudo da microestrutura, por sua vez, pode ser realizada através de uma análise metalográfica (PERES, 1994).

Embora a maioria das alterações ocorram nos primeiros centésimos de milímetro abaixo da superfície, esta profundidade pode tornar-se significativa para peças de parede fina.

Devido aos gumes dos grãos abrasivos utilizados no brunimento serem muito pequenos e existirem muitos grãos cortando simultaneamente, calor e tensão gerados na peça nunca são concentrados. Como resultado, um mínimo de dano é produzido na superfície, e a integridade das superfícies brunidas é especialmente boa (WICK et al., 1985).

CAPÍTULO 8

EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA

8.1 Considerações iniciais

Sendo uma operação largamente empregada e vital para o correto funcionamento das válvulas hidráulicas, o brunimento deve receber atenção especial dos fabricantes dessas válvulas, como é despendida pela Mannesmann Rexroth Automação Ltda.

Esta empresa produz, em sua unidade fabril localizada em Pomerode - SC, válvulas hidráulicas direcionais cujo desempenho depende, principalmente, de um perfeito ajuste entre o furo central da carcaça e o êmbolo. O furo central da carcaça necessita de um controle da dimensão do diâmetro, de um erro de forma e de valores de rugosidade R_z da ordem de milésimos de milímetro, somente alcançados através do brunimento.

Visando melhorias no processo e redução de custo, as ferramentas de brunimento de passe único utilizadas até então foram substituídas por ferramentas de passe único com outra forma construtiva, do tipo bucha diamantada.

A preocupação com o desempenho das novas ferramentas por parte da empresa, no que tange ao controle do processo e qualidade do produto, levantou a necessidade de uma avaliação mais profunda quanto aos resultados produzidos na peça devido a variações nas grandezas de entrada do processo de brunimento.

Para a realização desta avaliação decidiu-se pela utilização das próprias carcaças de válvulas como corpos de prova. A infra-estrutura do estudo foi cedida pela empresa e pela Universidade Federal de Santa Catarina.

8.2 Materiais e equipamentos utilizados

Na realização deste trabalho foram utilizados os materiais descritos a seguir.

8.2.1 Peça

Como mencionado acima, carcaças de válvulas hidráulicas foram utilizadas como corpos de prova. Estas carcaças são fabricadas em ferro fundido cinzento DIN GG30, cuja composição está detalhada na tabela 8.1 (CHIAVERINI, 1990).

A figura 8.1 apresenta a estrutura do material da peça mostrando os constituintes perlita,

ferrita e os veios de grafita.

A pré-usinagem nestas peças é realizada com alargadores de gume único que proporciona um sobremetal de 0,05 mm para a operação de acabamento de brunimento. Deve-se salientar que o formato construtivo da peça apresenta descontinuidades ao longo do furo que deve ser brunido, fato que, por um lado, dificulta a obtenção de geometrias acuradas devido à pequena área de apoio proporcionada à ferramenta mas que, por outro lado, auxilia na retirada de cavaco da região de corte e que, por isso, contribui para a obtenção de uma melhor textura da superfície.

Tabela 8.1 – Composição química do ferro fundido cinzento GG30

Classe	Composição química				
	C	Si	Mn	P	S
GG30	2,90/3,40	1,70/2,30	0,45/0,80	0,15/0,30	0,08/0,12

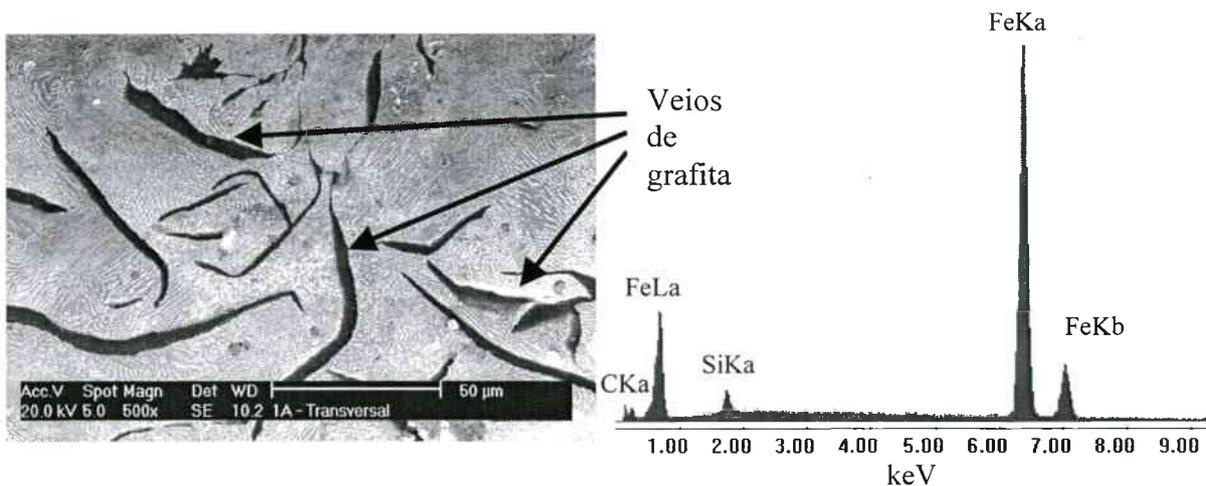


Figura 8.1 – Aspecto micrográfico do ferro fundido cinzento GG30 atacado com nital, ampliação de 500x, e análise química da superfície por energia dispersiva

A dimensão e o acabamento final do furo central da peça são atingidos após a utilização sequencial de três ferramentas ajustadas com diferentes diâmetros e diferentes tamanhos de grãos abrasivos, como será detalhado no próximo item.

Externamente a peça possui impressões em baixo relevo das letras B, T e A que serão utilizadas como referência para localização da região de entrada e saída da ferramenta bem como para o acompanhamento dos colos brunidos que serão denominados como Ø1, Ø2, Ø3 e Ø4. A

vista em corte com as dimensões relevantes da peça é fornecida na figura 8.2.

8.2.2 Ferramenta

Para atender aos requisitos da peça, descrita no item anterior, de modo a serem atingidas as tolerâncias de forma, dimensional e rugosidade, bem como a retirada do sobremetal proveniente da operação de usinagem anterior, as ferramentas foram projetadas com as características mostradas nas figuras 8.3, 8.4 e 8.5.

As três ferramentas utilizadas na multi-operação de brunimento possuem o mesmo formato construtivo, diferenciando-se apenas pelo tamanho de grão empregado e pelo diâmetro em que foi ajustada. Os dados relativos ao processo de usinagem estão detalhados na figura 8.3.

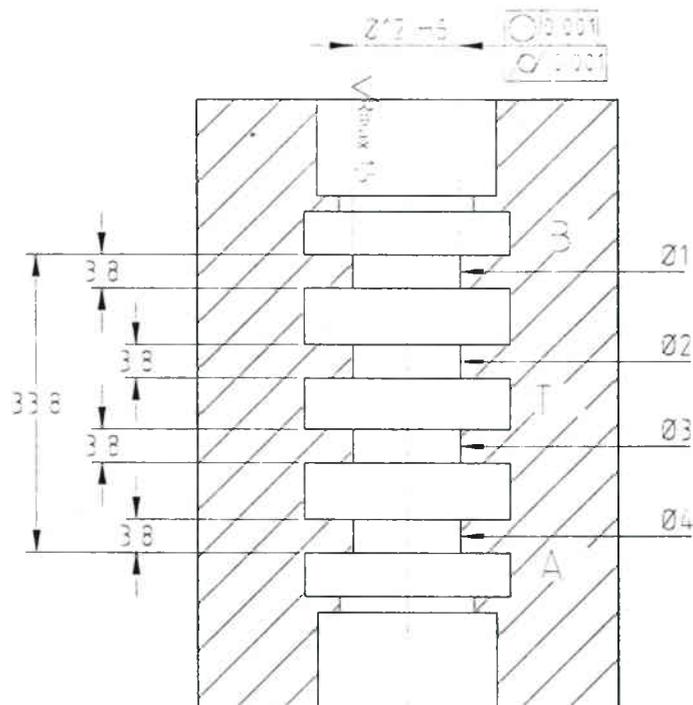


Figura 8.2 – Vista em corte da peça utilizada nos experimentos (dimensões em mm)

A primeira ferramenta, de desbaste, é recoberta com grãos de diamante natural D150, de acordo com a classificação FEPA, ou grão 140/170 MESH. A segunda ferramenta, de semi-acabamento, possui grãos de diamante D50 (270/325 MESH) enquanto que a ferramenta de acabamento é recoberta com grãos de diamante D30 (600 MESH).

As ferramentas possuem apenas três componentes, que são a haste cônica, a bucha abrasiva e a porca de regulagem, figura 8.4.

- Haste cônica

A haste cônica, figura 8.4, realiza a interface entre o dispositivo de fixação da ferramenta e os outros dois componentes, que são montados sobre ela. Em uma de suas extremidades existem dois pinos que realizam a montagem da ferramenta no dispositivo de fixação e na extremidade oposta existe uma rosca sobre a qual é montada a porca de regulagem.

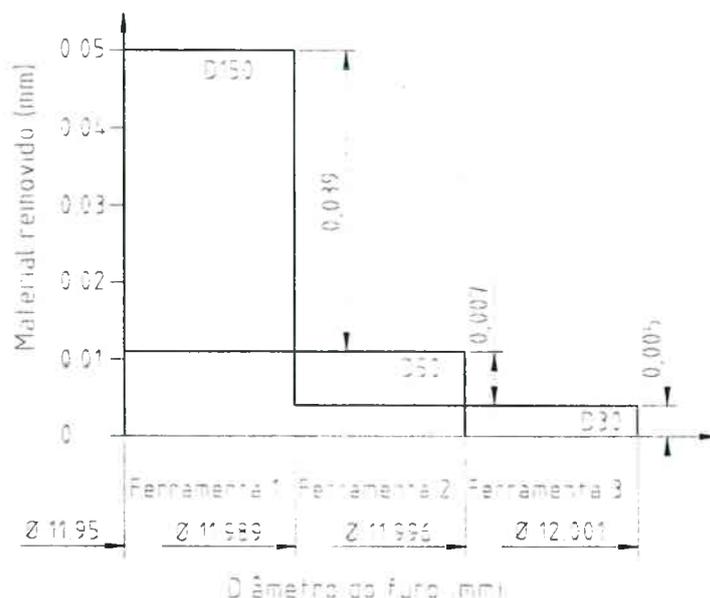


Figura 8.3 – Dados do processo de brunimento de válvulas hidráulicas

A região central da haste possui uma conicidade de 1:50 sobre a qual é encaixada a bucha abrasiva, que também possui um furo cônico. Na região em que a bucha é encaixada a haste possui uma camada de abrasivo de carboneto de silício, para que a fricção entre o abrasivo e a bucha não permita o escorregamento da bucha em relação à haste durante o brunimento.

O diâmetro do brunidor é ajustado através do deslizamento axial da bucha ao longo da haste cônica. A faixa de ajuste do brunidor é geralmente em torno de 50-60 μm o qual não deve ser excedido sob risco de deformação permanente da bucha. Nos brunidores utilizados neste trabalho, o movimento axial de deslizamento da bucha em relação à haste é conseguido através de uma porca localizada na extremidade da haste.

A conicidade da haste, aliada ao passo da rosca da porca de regulagem permite que, com a bucha montada, o diâmetro da ferramenta seja alterado em 1 μm a cada $\frac{1}{4}$ de volta da porca.

- Bucha abrasiva

A superfície externa da bucha possui uma camada de superabrasivos, sendo que neste trabalho foram utilizadas buchas de ferro fundido cobertas com grãos abrasivos de diamante natural. Esta camada é formada pela eletro-deposição do ligante, neste caso níquel, de um banho contendo as partículas de diamante.



Figura 8.4 – Componentes e detalhes construtivos da ferramenta utilizada

Os grãos de diamante formam uma camada única na superfície da bucha, como pode ser visto na figura 8.5, enquanto que a análise química do ligante pode ser vista na figura 8.6.

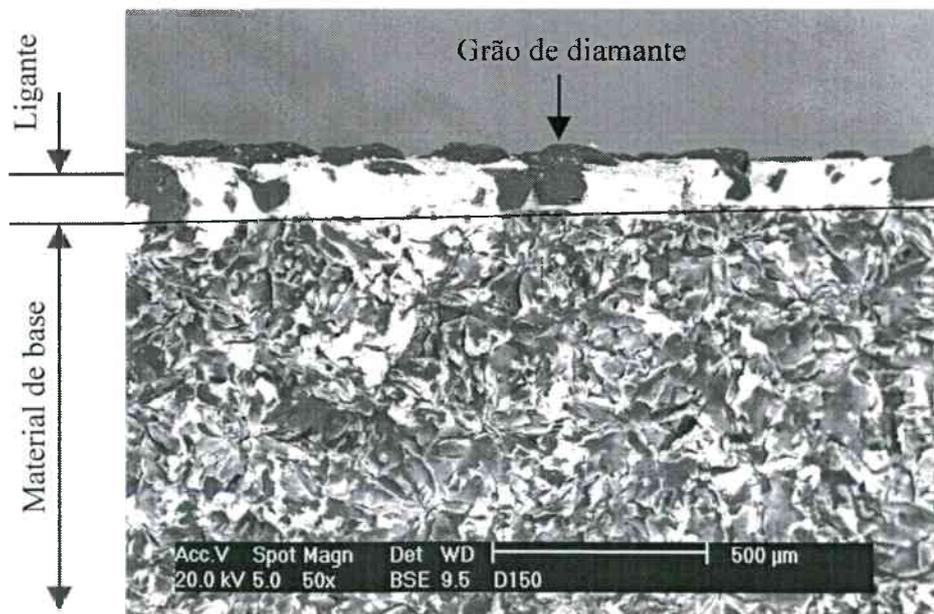


Figura 8.5 – Seção transversal da bucha abrasiva evidenciando o material de base, ligante e abrasivo

A superfície da bucha é dividida em 12 faixas ao longo do perímetro em que cada faixa apresenta, alternadamente, camadas de diamante e espaços sem abrasivos. Estas camadas são helicoidais, com um ângulo aproximado de 10° no sentido esquerdo. As camadas com abrasivo depositado realizam a retirada de material enquanto que as camadas sem deposição permitem o fluxo do óleo para retirada dos cavacos da zona de corte. A hélice esquerda auxilia na retirada dos cavacos, empurrando-os no sentido da gravidade.

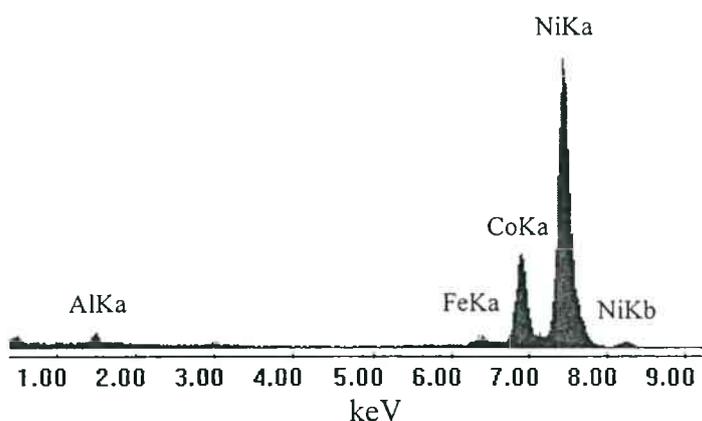


Figura 8.6 – Espectro por energia dispersiva do ligante utilizado nas ferramentas de brunir

A figura 8.7 mostra detalhes da bucha abrasiva e a figura 8.8 ilustra fotografias, obtidas através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), da superfície das buchas com grãos de diamante D150, ferramenta de desbaste e D30, ferramenta de acabamento.

Da figura 8.9 observa-se que o comprimento da bucha, 97,5 mm, que realiza a remoção de material do furo da peça, é delimitada pelo curso de trabalho da ferramenta e pela conicidade da bucha. Dessa forma, a área da superfície abrasiva pode ser aproximada de acordo com a expressão:

$$A_{abr} = A_{faixa} \times 6 = 336,61 \times 6 = 2019,66 \text{ mm}^2$$

Da figura 8.8, uma contagem aproximada do número de grãos de diamante mais protuberantes por área resultou em:

$$\text{Ferramenta de desbaste D150: } 48 \text{ grãos ativos} / 2,25 \text{ mm}^2 = 21,33 \text{ grãos/mm}^2$$

$$\text{Ferramenta de acabamento D30: } 50 \text{ grãos ativos} / 0,09 \text{ mm}^2 = 555,55 \text{ grãos/mm}^2$$

Assim, o número de grãos ativos sobre a superfície da bucha abrasiva pode ser aproximado como sendo:

Ferramenta de desbaste D150: $21,33 \text{ grãos/mm}^2 \times 2019,66 \text{ mm}^2 = 4,31 \cdot 10^4 \text{ grãos}$

Ferramenta de acabamento D30: $555,55 \text{ grãos/mm}^2 \times 2019,66 \text{ mm}^2 = 1,12 \cdot 10^6 \text{ grãos}$

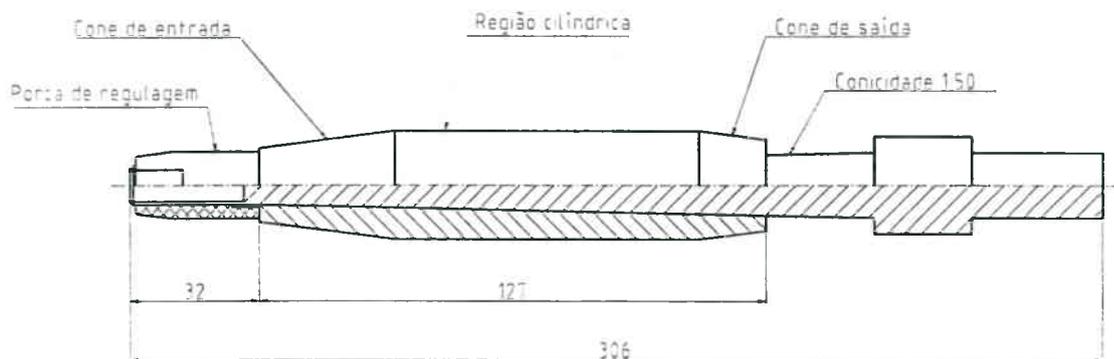


Figura 8.7 – Detalhes construtivos das ferramentas de brunir utilizadas (cones de entrada e saída fora de escala)

Ainda, o volume de material retirado por cada ferramenta, em uma única passada desta pelo furo da peça, pode ser obtido da figura 8.2, da peça, e da figura 8.3 como:

Ferramenta de desbaste D150:

$$V_{\text{usin}} = 4 \times \left\{ \pi \times 3,8 \times \left[(11,989)^2 - (11,95)^2 \right] \right\} = 44,58 \text{ mm}^3$$

Ferramenta de acabamento D30:

$$V_{\text{usin}} = 4 \times \left\{ \pi \times 3,8 \times \left[(12,001)^2 - (11,996)^2 \right] \right\} = 5,73 \text{ mm}^3$$

Assim, o volume de material usinado por cada partícula de diamante, supondo que todo grão tome parte do processo de corte e realize uma mesma quantidade de remoção de material é, aproximadamente:

$$\begin{aligned} \text{Ferramenta de desbaste D150: } V_{\text{usin/grão}} &= 44,58 \text{ mm}^3 / 4,31 \cdot 10^4 \text{ grãos} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{grão} \\ V_{\text{usin/grão}} &= 1,03 \cdot 10^6 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{grão} \end{aligned}$$

$$\text{Ferramenta de acabamento D30: } V_{\text{usin/grão}} = 5,73 \text{ mm}^3 / 1,12 \cdot 10^6 \text{ grãos}$$

$$V_{\text{usin/grão}} = 5,12 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{grão} = 5,12 \cdot 10^3 \text{ } \mu\text{m}^3/\text{grão}$$

As buchas abrasivas geralmente possuem a forma de barril, sendo a região de entrada e saída cônicas. A entrada cônica permite que a ferramenta seja inicialmente guiada pelo furo da peça e realize uma intensa e gradual retirada de material. A região cilíndrica realiza a calibração e remoção complementar de material do furo. O cone de saída tem a função de amenizar a saída da ferramenta do furo, reduzindo a vibração no retorno da mesma.

Como já mencionado no item anterior o diâmetro do brunidor é ajustado através do deslizamento axial da bucha ao longo da haste cônica. Para que esta expansão seja possível a bucha possui uma abertura em hélice, no mesmo ângulo das faixas abrasivas.

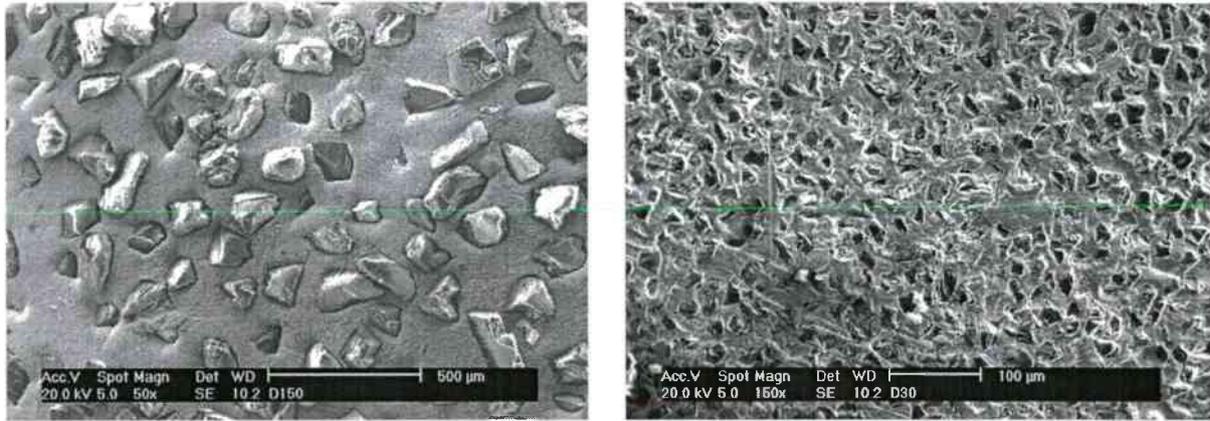


Figura 8.8 – Superfície das buchas abrasivas mostrando os grãos de diamante presos ao ligante. Ferramenta com abrasivo D150 (esquerda) e D30 (direita)

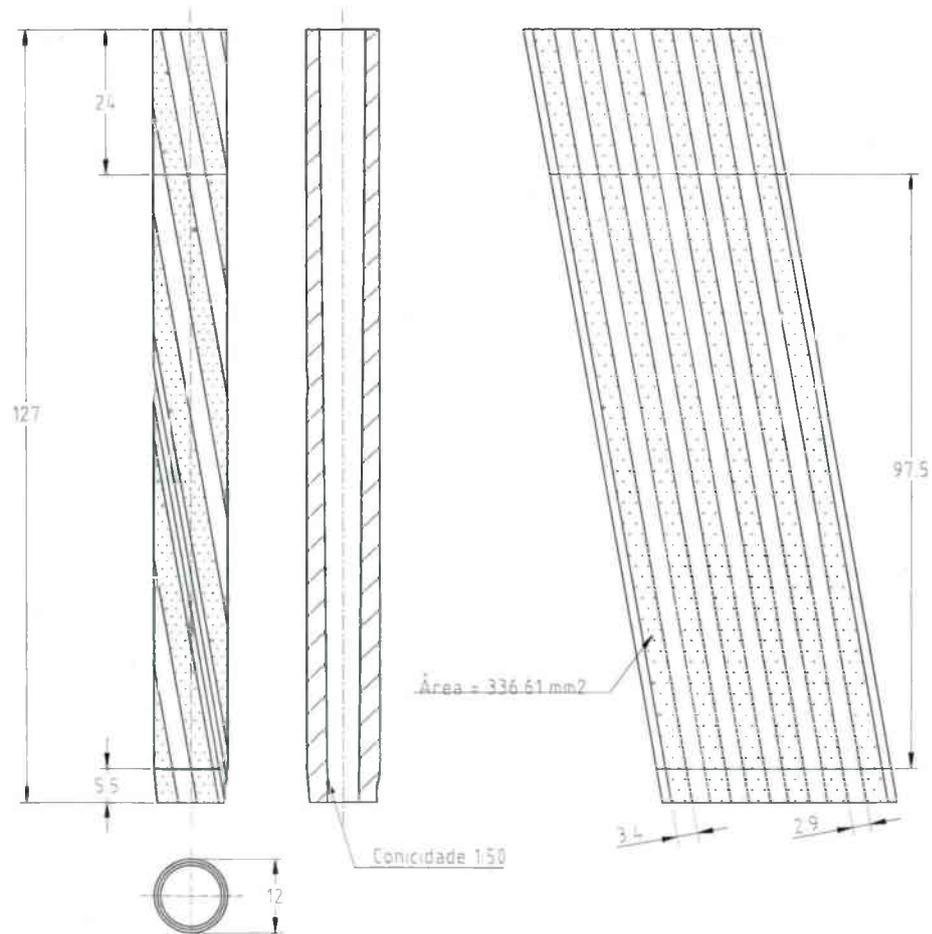


Figura 8.9 – Bucha abrasiva: detalhes construtivos (esquerda) e planificada (direita)

- Preparação da ferramenta

De acordo com o exposto no capítulo 6, item 6.1, a camada de abrasivo da bucha deve ser submetida a uma preparação, chamada de dressamento, antes de sua utilização. Esta operação é necessária para garantir a qualidade exigida pela peça, eliminando a camada de grãos soltos ou fracamente aderidos ao ligante, uniformizando a superfície da bucha e eliminando a excessiva agressividade dos grãos de diamante através do arredondamento de seus gumes. Quando os grãos de diamante são muito agressivos, estes apresentam a tendência de encravamento na superfície do furo, ocasionando uma remoção irregular de material e vibração da ferramenta com a conseqüente perda da precisão dimensional e acabamento da superfície do furo.

A figura 8.10 mostra fotografias da camada abrasiva da ferramenta de desbaste, grãos de diamante D150, antes da operação de dressamento e após esta operação. Nota-se que os grãos abrasivos sofreram um certo desgaste que produziu faces planas e o arrancamento e lascamento de alguns grãos de diamante, figura 8.11.

Na figura 8.11 pode-se perceber a diferença entre o tamanho dos grãos de diamante da ferramenta de desbaste (D150) e dos grãos da ferramenta de acabamento (D30). A fotografia dos grãos D150 possui ampliação 5x menor que a fotografia dos grãos D30. Os grãos abrasivos estão muito bem engastados no ligante, fato que permite o brunimento de materiais duros sem arrancamento do grão. A porção do grão de diamante que fica exposta na ferramenta de acabamento é menor que na ferramenta de desbaste.

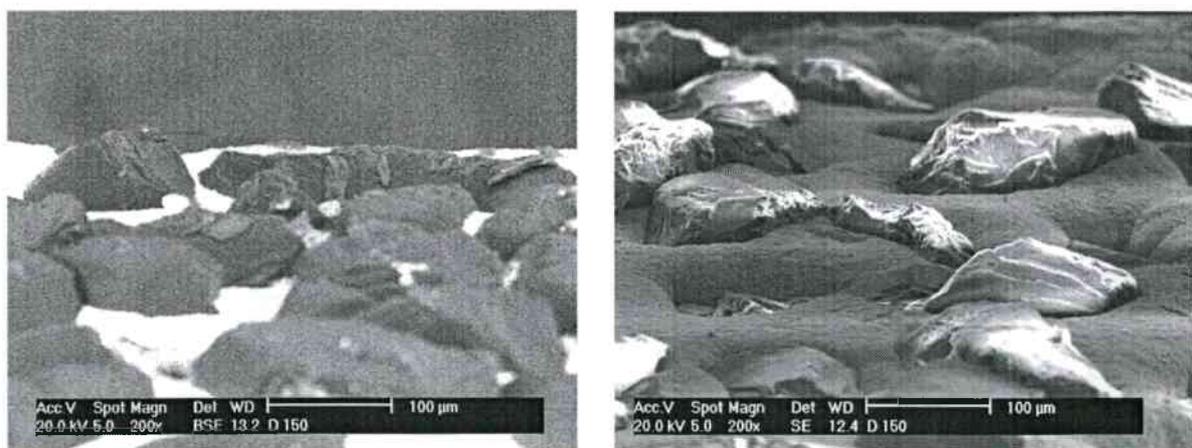


Figura 8.10 – Grãos de diamante da ferramenta de desbaste, D150, antes da operação de dressamento (esquerda) e após a operação de dressamento (direita).

Ampliação: 200x

Uma análise das imagens da figura 8.10 e 8.11 revela que a linha do horizonte da ferramenta apresenta contornos semelhantes aos obtidos por MILLER, 1996.

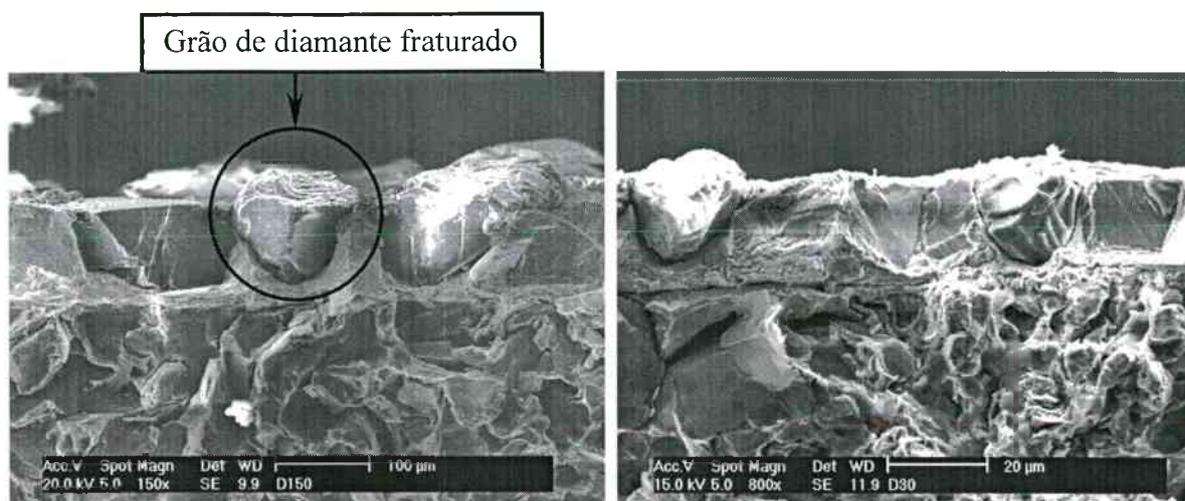


Figura 8.11 – Exposição da porção de corte dos grãos de diamante, D150 (esquerda, ampliação: 150x) e D30 (direita, ampliação: 800x)

Nas ferramentas utilizadas neste trabalho, o dressamento foi realizado nas seguintes etapas:

1 – A haste cônica foi fixada em uma brunidora manual horizontal e o abrasivo de carboneto de silício foi dressado com o auxílio de uma lixa flexível com grão 220. Esta etapa tem o objetivo de eliminar a excessiva agressividade do abrasivo que poderia ocasionar, após a montagem da bucha, o engripamento do conjunto não permitindo mais a regulagem do diâmetro da ferramenta;

2 – A bucha diamantada foi colocada sobre a haste cônica e a porca de regulagem foi posicionada e avançada até o diâmetro da ferramenta se aproximar do especificado na figura 8.3;

3 – A ferramenta foi colocada em movimento de rotação e segmentos de rebolos de óxido de alumínio foram friccionados sobre a superfície da bucha;

4 – Após esta etapa, uma peça foi utilizada e brunida manualmente, sendo a ferramenta ajustada até que o diâmetro do furo obtido na peça atingisse o especificado na figura 8.3.

A influência da utilização de ferramentas sem a operação de dressamento sobre as características geométricas e da superfície da peça são analisadas no capítulo 11.

8.2.3 Máquina

A máquina utilizada foi uma brunidora especial da marca Unima. Esta brunidora possui seis fusos verticais para fixação de ferramentas e uma mesa rotativa com oito posições onde são colocados os dispositivos de fixação das peças a serem brunidas.

Dos seis fusos disponíveis, três são utilizados para ferramentas de brunimento e os três restantes são utilizados, intercaladamente, com escovas para a remoção de rebarbas. O acionamento é independente e realizado através de variadores de velocidade que abrangem uma faixa de rotações de 0 a 1050 rpm.

A estrutura onde são montados os seis fusos de rotação é, por sua vez, acionada por outro variador de velocidade que permite a regulação do avanço axial do conjunto.

Dois estações de trabalho da mesa rotativa são utilizadas como estação de alimentação de peças e estação de medição, sendo que esta última não utilizada neste estudo. A figura 8.12 ilustra a máquina utilizada

8.2.4 Dispositivos de Fixação

Para compensar os erros de alinhamento entre o eixo da ferramenta e o eixo do furo da peça foram utilizados dispositivos de fixação da peça rígidos e dispositivos de fixação da ferramenta articulados, figura 8.12, à direita.

A fixação da ferramenta é do tipo cardã, ou junta bi-articulada, semelhante ao apresentado na figura 5.13.

8.2.5 Óleo de Corte

Como óleo de corte foi utilizado um óleo especial para brunimento com baixa viscosidade, 4 cSt à 40°C, que possui grande capacidade de refrigeração, reduz a perda por arraste e facilita a decantação de cavacos finos, fato que melhora o acabamento da superfície obtida.

O óleo de corte é armazenado em um tanque e é alimentado até a região de corte através de uma bomba, sendo jorrado sobre o dispositivo de fixação e a peça. No retorno o óleo sofre uma filtragem, através de separadores magnéticos e manta de papel, dos cavacos provenientes do brunimento.

8.2.6 Equipamentos de Medição e de Microscopia

Nas medições de erro de circularidade, erro de cilindricidade, diâmetro e rugosidade da

superfície da peça foram utilizados os equipamentos descritos a seguir.

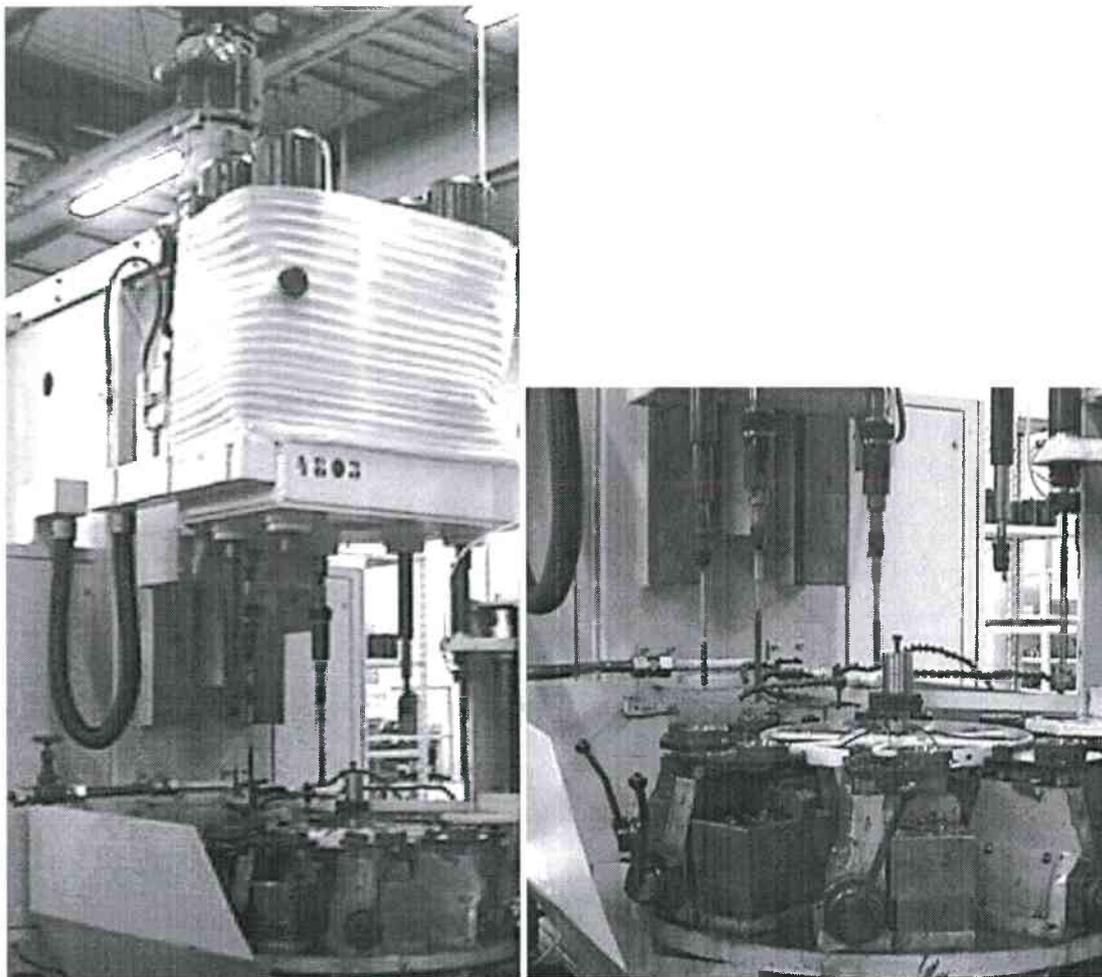


Figura 8.12 – Máquina de brunir especial utilizada nos ensaios. Vista geral (esquerda) e detalhe dos dispositivos e ferramentas (direita)

Os erros de cilindricidade e circularidade, definidos no capítulo 5, foram medidos em uma máquina de medir erros de forma marca Perthen, modelo MMQ-3 e apalpador com 3 mm de diâmetro. Para a obtenção do valor do erro de cilindricidade, foi medida a circularidade em quatro pontos diferentes da peça, $\varnothing 1$, $\varnothing 2$, $\varnothing 3$ e $\varnothing 4$, de acordo com a figura 8.3. O cálculo do erro de cilindricidade é realizado automaticamente pelo equipamento através dos perfis de circularidade.

As medidas dos diâmetros foram executadas em uma máquina de medir por coordenadas marca Zeiss, modelo ZMC 550 e apalpador com 8 mm de diâmetro. O diâmetro obtido foi considerado como sendo a média das medições nos quatro pontos descritos, sendo que em cada

ponto foram realizadas quatro medições ortogonais.

A figura 8.13 ilustra os métodos de medição descritos acima.

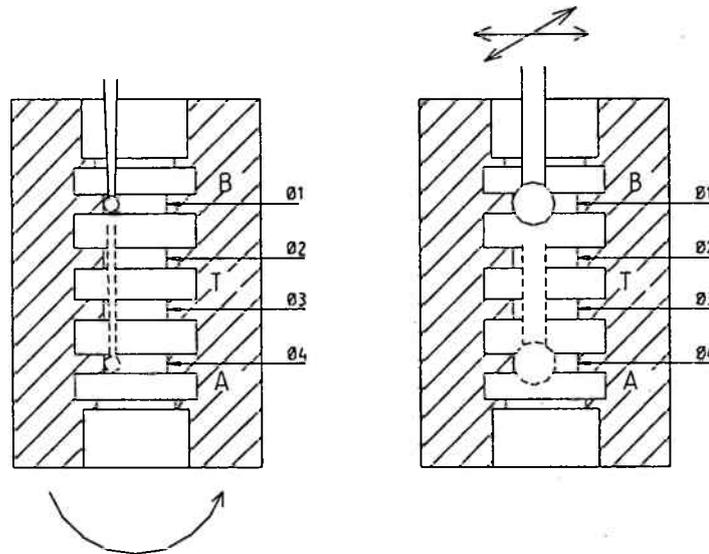


Figura 8.13 – Medição de circularidade e cilindricidade (esquerda) e medição do diâmetro (direita)

As medições da textura da superfície do furo, parâmetros de rugosidade, foram realizadas através de um rugosímetro marca Mahr, modelo S8P, com apalpadores mecânico (raio de ponta de 5 μm) e ótico (diâmetro do foco de 1 μm). Foi realizada uma medição de rugosidade em cada um dos quatro colos da peça, sendo a média destas medidas considerada como o valor da rugosidade da superfície do furo.

A avaliação visual da textura da superfície do furo, e da superfície das buchas abrasivas, foi realizada com o auxílio de imagens obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura XL 30, marca Philips.

8.3 Análise Estatística

Para que o resultado dos experimentos tenha um grau de confiabilidade aceitável deve-se realizar uma quantidade mínima de medições dos resultados produzidos pelo processo de brunimento.

No cálculo do tamanho da amostra é necessário que se conheça o tipo de distribuição da amostra, onde os valores obtidos apresentam uma determinada probabilidade de ocorrência. Para isto existem distribuições padronizadas, obtidas de modelamento matemático de experimentos,

assim como testes, que fundamentam as análises estatísticas (MESQUITA, 1980 e SCHROETER, 1997).

A determinação do tipo da distribuição da amostra e o cálculo do tamanho da amostra serão realizados através dos métodos descritos nos itens 8.3.1 e 8.3.2, a seguir.

A identificação e quantificação dos efeitos causados pelos 5 parâmetros de entrada, definidos no capítulo 2, sobre o resultado do brunimento de desbaste será realizada através do método de experimento fatorial de meia fração, 2^{k-1} , em conjunto com a análise de variância.

A seguir a melhor combinação de parâmetros de entrada, aquela que fornecer os melhores resultados para a ferramenta de desbaste, será utilizada para o brunimento dos corpos de prova que serão empregados na otimização do processo, ferramentas de semi-acabamento e de acabamento.

A concepção da máquina de brunir utilizada neste trabalho, figura 8.12, obriga que a regulagem da velocidade axial e do curso sejam as mesmas para todas as ferramentas. A única variável que pode ser alterada para as ferramentas de semi-acabamento e acabamento, independentemente da ferramenta de desbaste, é a velocidade periférica. As características da peça, sobremetal e erro de cilindridade, são dependentes do resultado do trabalho da ferramenta de desbaste.

Assim, a otimização do processo de brunimento, para as ferramentas de semi-acabamento e de acabamento, será realizada com a variação da velocidade periférica da ferramenta.

Os métodos estatísticos empregados para a identificação e quantificação dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre os resultados do processo e para a otimização do processo são descritos nos itens 8.3.3 e 8.3.4.

8.3.1 Determinação do tipo de distribuição estatística da amostra

Uma das distribuições mais conhecidas é a distribuição normal, que pode ser verificada através do teste Qui-quadrado ou do teste Kolmogorov-Smirnov (KREYSZIG, 1970).

O teste Qui-quadrado foi escolhido para a verificação da normalidade da distribuição das medições de erro de cilindridade, erro de circularidade, diâmetro e rugosidade R_a , R_z e R_{max} .

O resultado do teste Qui-quadrado depende fortemente do tamanho da amostra, que deve ser escolhida como um valor que represente um compromisso entre confiabilidade, tempo e custo dos experimentos. Entretanto, ensaios desta natureza geralmente resultam em distribuições normais (SCHROETER, 1997).

Assim, foram tomados, aleatoriamente, 35 corpos de prova, carcaças de válvulas, brunidos com ferramentas de passe único tipo bucha diamantada e medidos o erro de cilindridade, erro de circularidade, diâmetro, rugosidade R_a , rugosidade R_z e rugosidade R_{max} .

A verificação de que os valores medidos pertencem a uma distribuição normal, através do teste Qui-quadrado, é realizada de acordo com a seguinte seqüência (KRESZYG, 1970 e MONTGOMERY, 1991):

- adota-se uma hipótese nula e verifica-se através do teste se esta hipótese pode ou não ser aceita, H_0 : distribuição é normal;
- adota-se uma segunda hipótese, contrária à primeira, H_1 : distribuição não é normal;
- adota-se uma probabilidade de erro (nível de significância), $\alpha = 0,05$. Isto representa uma probabilidade de 5% de rejeitarmos a hipótese H_0 , mesmo sendo ela verdadeira;
- dividir os valores medidos em uma quantidade de classes k , chamadas de freqüência de classes observada, suficientemente grande, com a mesma largura de classes, se possível;
- observar que cada classe deve possuir uma freqüência mínima de cinco resultados de medição, sendo que quando esse critério não for satisfeito deve-se reagrupar as classes;
- calcular a média, e o desvio-padrão das medições através das expressões:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8.2)$$

onde: x_i – medida individual;

n – número de medidas;

\bar{x} – média das n medidas individuais

s – desvio padrão das “ n ” medidas

- transformar os valores de limite superior das classes $x_{i,o}$ em valores normalizados $z_{i,o}$:

$$z_{i,o} = \frac{x_{i,o} - \bar{x}}{s} \quad (8.3)$$

- com o auxílio da tabela padronizada de distribuição normal cumulativa, calcular a função de distribuição $F(z_{i,o})$;

- calcular as freqüências esperadas:

$$E = (F(z_{i,o}) - F(z_{i-1,o})) \cdot n \quad (8.4)$$

- calcular o tamanho do teste Qui-quadrado para cada classe individual:

$$\chi_i^2 = \frac{(B - E)^2}{E} \quad (8.5)$$

- calcular a soma dos valores do Qui-quadrado para todas as classes individuais:

$$\chi_{\text{calc}}^2 = \sum_{i=1}^k \chi_i^2 \quad (8.6)$$

- comparar o valor do do Qui-quadrado calculado, χ_{calc}^2 com o valor crítico do Qui-quadrado, χ_{crit}^2 , obtido da tabela de distribuição χ^2 .

- o valor do χ_{crit}^2 é determinado de acordo com o nível de significância escolhido, α , e o grau de liberdade, v , da distribuição. O grau de liberdade é determinado em função do número de classes k e do número de parâmetros aproximados r ($r = 2$ já que a média e o desvio-padrão da população foram aproximados para a média e desvio-padrão da amostra):

$$v = k - r - 1 \quad (8.7)$$

A comparação entre os valores χ_{calc}^2 e os valores de χ_{crit}^2 tabelados, detalhados no anexo 2, para as medições de erro de circularidade, erro de cilindridade, diâmetro, rugosidade R_a , rugosidade R_{max} e rugosidade R_z revela que para todos os parâmetros medidos resultou em $\chi_{\text{calc}}^2 < \chi_{\text{crit}}^2$.

Dessa forma a hipótese inicial H_0 não pode ser descartada e as distribuições podem ser consideradas normais, com uma confiabilidade de 95 %.

8.3.2 Cálculo do tamanho da amostra

De acordo com SCHROETER, 1997, para que o tempo para as medições mantenha-se dentro de patamares razoáveis, deve ser determinada a quantidade mínima de ensaios necessária para a definição dos valores médios de erro de circularidade, erro de cilindridade, diâmetro, rugosidade R_a , rugosidade R_z e rugosidade R_{max} .

Ainda segundo SCHROETER, 1997, a quantidade de medições “n” pode ser determinada, com um intervalo de confiança $2a$ para o valor da média e um nível de confiança γ , pela expressão:

$$n = \frac{t^2 \cdot s^2}{a^2} \quad (8.8)$$

Onde: s – desvio-padrão

t – coeficiente de Student

O intervalo de confiança $2a$ para o valor da média deve estar na ordem de grandeza da incerteza de medição dos instrumentos utilizados.

Assim, isolando o intervalo de confiança na expressão obtém-se a equação:

$$2a = 2 \sqrt{\frac{t^2 \cdot s^2}{n}} \quad (8.9)$$

Foram determinadas as incertezas de medição da Máquina de Medir por Coordenadas, da Máquina de Medir Erros de Forma e do Rugosímetro de acordo com as especificações do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (INMETRO, 1997). As incertezas de medição destes equipamentos estão no anexo 3.

Devido à não-disponibilização de um padrão de cilindridade, não foi possível determinar a incerteza de medição da máquina para as medidas de erro de cilindridade. Para o cálculo do tamanho da amostra, considerou-se que a incerteza de medição de erro de cilindridade é duas vezes maior que a incerteza de medição de erro de circularidade. Isto devido ao fato de a medição de erros de cilindridade ser mais crítica que a de circularidade.

Da mesma forma, devido à inexistência de padrões de rugosidade para o apalpador ótico, o número de medições encontrados para o apalpador mecânico será considerado o mesmo para o apalpador ótico.

O nível de confiança foi estabelecido a $\gamma = 95\%$. O desvio-padrão foi tomado como sendo o obtido com as medidas das amostras utilizadas na determinação do tipo da distribuição, anexo 2.

Com os dados obtidos, verifica-se que para satisfazer a coincidência dos valores do intervalo de confiança $2a$ com os valores das incertezas de medição, foram obtidas diferentes quantidades de amostras, anexo 4.

Segundo os critérios definidos, para a média das medições de diâmetro 6 amostras seriam suficientes para garantir uma confiabilidade de 95 % no valor obtido. Já para as medições de circularidade e cilindridade 5 e 9 amostras, respectivamente, são necessárias. As medições de rugosidade R_a são confiáveis com 9 amostras enquanto que a rugosidade R_{max} e R_z necessitam de 17 e 22 amostras respectivamente.

O número de amostras necessárias foi definido como sendo 10 amostras, que atende à maioria das características a serem medidas. Com esse número de amostras a confiabilidade dos resultados para as medições de rugosidade R_z e rugosidade R_{max} torna-se de 85%.

8.3.3 Experimentos Fatoriais

Os experimentos fatoriais são amplamente utilizados em ensaios envolvendo vários fatores onde é necessário estudar o efeito conjunto destes fatores sobre um resultado. Em um experimento fatorial são investigadas todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (MONTGOMERY, 1991).

O efeito de um fator é definido como sendo a mudança no resultado produzida por uma mudança no nível do fator. Isto é freqüentemente chamado de efeito principal porque é referente aos efeitos primários do experimento. Quando a diferença de resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores considera-se que há uma interação entre os fatores.

Um caso especial dos experimentos fatoriais é o de k fatores, cada um em dois níveis apenas. Estes níveis podem ser quantitativos, como dois valores de temperatura, pressão ou tempo; ou podem ser qualitativos, como duas máquinas, dois operadores, os níveis alto e baixo de um fator ou a presença e ausência de um fator. Esse experimento é chamado de experimento fatorial 2^k (MONTGOMERY, 1991).

Como exemplo, um experimento fatorial de 3 fatores, A, B e C, cada um nos níveis alto (+) e baixo (-) produzirá $2^3 = 8$ ensaios e pode ser montado como demonstrado na tabela 8.2. As letras "A", "B" e "C" representam os efeitos dos fatores e as letras minúsculas representam a combinação do tratamento de um fator no nível alto e os demais fatores nos níveis baixos. Assim, "a" representa a combinação do tratamento do fator A no nível alto e B e C no nível baixo. A representação da combinação de todos os tratamentos no nível baixo é realizada pelo símbolo "(1)".

Neste trabalho pretende-se verificar a influência de 5 parâmetros de entrada (velocidade periférica, velocidade axial, curso da ferramenta, sobremetal da peça e erro de cilindridade inicial da peça) sobre a qualidade geométrica final da peça brunida. Esta verificação será realizada com a ferramenta de brunir de desbaste, recoberta com grãos de diamante D150. O resultado será avaliado segundo a cilindridade, diâmetro e rugosidade obtidos.

A utilização de um experimento fatorial 2^k pode determinar o efeito destes k fatores, parâmetros de entrada, sobre o resultado obtido. Para isto cada fator deve ser considerado em dois níveis quantitativos. Neste caso seriam necessários $2^5 = 32$ ensaios para que todos os efeitos dos fatores principais e suas interações possam ser determinados.

Como a realização deste número de ensaios requer uma grande parcela de tempo e visto que, segundo MONTGOMERY, 1991, pode-se assumir que os efeitos das interações de ordem

mais alta são desprezíveis, então informações referentes aos efeitos principais e interações de ordens menores podem ser obtidas pela execução de apenas uma fração do experimento fatorial completo.

Tabela 8.2 – Montagem e notações utilizadas em um experimento fatorial 2^3

Ensaio	A	B	C	Combinação dos tratamentos
1	-	-	-	(1)
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

Este tipo de experimento é chamado de experimento fatorial fracionado. O uso de experimentos fatoriais fracionados é baseado na idéia de que quando existem várias variáveis, o sistema, ou processo, é governado principalmente por alguns dos efeitos principais e suas interações de baixa ordem. O experimento fatorial fracionado pode ser projetado dentro de um experimento maior como um subconjunto de fatores significantes.

Uma das variantes do experimento fatorial fracionado é o experimento fatorial de meia fração de 2^k , denotado como 2^{k-1} . Para a obtenção de um experimento deste tipo os efeitos com maiores interações são confundidos. Um experimento com 5 fatores, $2^{5-1} = 16$ ensaios, que será utilizado neste trabalho, é chamado de experimento de resolução V, 2^{5-1}_V . Neste tipo de experimento nenhum efeito principal e nenhuma interação entre dois fatores é confundida com qualquer outro efeito principal ou interação de dois fatores. Entretanto, as interações entre dois fatores são confundidas com as interações entre três fatores (MONTGOMERY, 1991).

Um experimento fatorial de meia fração com 5 fatores, A, B, C, D e E pode ser montado como está representado na tabela 8.3.

A coluna E = ABCD é construída através da combinação, multiplicação dos sinais, das outras colunas. Os efeitos principais são confundidos com interações entre quatro fatores, ou

seja, quando são estimados os efeitos A, B, C, D, e E na verdade são estimados os efeitos de A + BCDE, B + ACDE, C + ABDE, D + ABCE e E + ABCD. Os efeitos de interações entre dois fatores são confundidos com interações de três fatores, por exemplo, a estimativa do efeito da interação entre AB é na verdade uma estimativa de AB + CDE.

Entretanto, visto que as interações entre três fatores, ou mais, podem ser desprezadas assegura-se que são estimados os efeitos dos fatores principais e das interações de dois fatores (MONTGOMERY, 1991).

Tabela 8.3 – Montagem de um experimento fatorial 2^{5-1}_v

Ensaio	A	B	C	D	E = ABCD	Combinação do tratamento
1	-	-	-	-	+	e
2	+	-	-	-	-	a
3	-	+	-	-	-	b
4	+	+	-	-	+	abe
5	-	-	+	-	-	c
6	+	-	+	-	+	ace
7	-	+	+	-	+	bce
8	+	+	+	-	-	abc
9	-	-	-	+	-	d
10	+	-	-	+	+	ade
11	-	+	-	+	+	bde
12	+	+	-	+	-	abd
13	-	-	+	+	+	cde
14	+	-	+	+	-	acd
15	-	+	+	+	-	bcd
16	+	+	+	+	+	abcde

A análise de variância é utilizada para examinar a magnitude dos efeitos dos fatores e determinar quais variáveis são importantes. Em experimentos fatoriais a análise de variância é realizada de acordo com a tabela 8.4.

A soma dos quadrados dos efeitos é calculada pela expressão:

$$SS_{A...K} = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (8.10)$$

A soma dos quadrados totais é calculada através da fórmula:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (8.11)$$

E a soma dos quadrados do erro:

$$SS_E = SS_T - SS_A - \dots - SS_{A...K} \quad (8.12)$$

O quadrado médio, MS, é obtido pela divisão da soma dos quadrados pelo grau de liberdade.

O valor de F_0 calculado é comparado com um valor de F tabelado, cujo valor corresponde a F_{α, n_1-1, n_2-1} . Se o valor de F calculado for maior que o tabelado então a hipótese H_0 , todos os tratamentos têm médias iguais, é rejeitada e os tratamentos apresentam diferenças significativas entre seus efeitos. A probabilidade de rejeição da hipótese H_0 quando ela for verdadeira é fixada pelo valor de α .

Em experimentos fatoriais 2^{k-1} são realizados, geralmente, apenas um ensaio por combinação de tratamentos. Nestes casos não há estimativa do erro. Entretanto, visto que assume-se que certas interações de alta ordem são desprezíveis, suas médias quadradas podem ser combinadas para a estimativa do erro (MONTGOMERY, 1991).

Porém, ocasionalmente, podem ocorrer interações de alta ordem significantes em experimentos fatoriais não replicados, tornando indevido o uso das interações de alta ordem como estimativa do erro.

Um método de análise nestes casos é plotar as estimativas dos efeitos em um gráfico de probabilidade normal. Nesta plotagem os efeitos desprezíveis são distribuídos normalmente, com média zero e variância σ^2 , tendendo a cair ao longo de uma linha reta. Os efeitos significantes, por sua vez, não possuem média zero e não se distribuem ao longo de uma linha reta.

8.3.4 Teste múltiplo de Duncan

O teste múltiplo de Duncan, descrito por MONTGOMERY, 1991, é utilizado para comparar pares de médias de tratamentos em que a hipótese nula que se deseja testar é $H_0: \mu_i = \mu_j$, médias iguais, para todos os tratamentos. Esse teste será utilizado na otimização das velocidades periféricas das ferramentas de semi-acabamento e de acabamento. O teste

determinará se os pares das médias dos valores medidos (cilindricidade, diâmetro, rugosidade R_a e rugosidade R_z), obtidos com diferentes velocidades periféricas, diferem significativamente. Caso ocorram médias significativamente diferentes entre si, a velocidade periférica que resultou na característica mais desejada será tomada como a mais adequada.

Tabela 8.4 – Análise de variância para experimentos fatoriais fracionados 2^{k-1}

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F_0
Efeitos principais				
A	1	SS_A	MS_A	MS_A/MS_E
:	:	:	:	:
K	1	SS_K	MS_K	MS_K/MS_E
Interações entre dois fatores				
AB	1	SS_{AB}	MS_{AB}	MS_{AB}/MS_E
:	:	:	:	:
JK	1	SS_{JK}	MS_{JK}	MS_{JK}/MS_E
Interações entre três fatores				
ABC	1	SS_{ABC}	MS_{ABC}	MS_{ABC}/MS_E
:	:	:	:	:
IJK	1	SS_{IJK}	MS_{IJK}	MS_{IJK}/MS_E
Interação dos k fatores				
ABC...K	1	$SS_{ABC...K}$	$MS_{ABC...K}$	$MS_{ABC...K}/MS_E$
Erro	$2^{k-1}(n - 1)$	SS_E	MS_E	
Total	$n2^{k-1} - 1$	SS_T		

A aplicação do teste múltiplo de Duncan é efetuada de acordo com os passos descritos a seguir:

- as médias dos tratamentos são dispostas em ordem crescente;
- o erro-padrão de cada média é determinado pela expressão:

$$S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (8.13)$$

- da tabela de Duncan são obtidos os valores de $r_\alpha(\rho, f)$ para os $\rho = 2, 3, \dots, a$, números de médias a serem verificadas. α é o nível de significância e f é o número de graus de liberdade do erro;

- calcular a gama mínima significante:

$$R_\rho = r_\alpha(\rho, f)S_{\bar{y}_i} \quad \text{para } \rho = 2, 3, \dots, a \quad (8.14)$$

- calcular a diferença entre a maior e a menor média e compará-la com a maior gama mínima significante;

- calcular a diferença entre a maior e a segunda menor média e compará-la com a segunda maior gama mínima significante;

- continuar o processo até que todas as diferenças possíveis entre os pares de média tenham sido considerados;

- se uma diferença observada é maior que a gama mínima significante correspondente, então a hipótese H_0 é rejeitada e os pares de médias são considerados significantemente diferentes.

CAPÍTULO 9

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

9.1 Influências dos parâmetros de entrada sobre o resultado do brunimento – ferramenta de desbaste

9.1.1 Determinação dos parâmetros de entrada

Os ensaios envolvidos no experimento fatorial fracionado visam identificar e quantificar os efeitos causados pelos parâmetros de entrada sobre o resultado do processo de brunimento com ferramentas do tipo bucha diamantada.

Parâmetros de entrada

- *variável A*: sobremetal (mm);
- *variável B*: erro de cilindridade inicial (μm);
- *variável C*: velocidade periférica (m/min);
- *variável D*: velocidade axial (m/min);
- *variável E*: curso (mm).

Resultados do processo

- erro de cilindridade final (μm);
- erro de circularidade final (μm);
- diâmetro (mm);
- rugosidade final R_a (μm);
- rugosidade final R_z (μm).

Esta verificação experimental foi realizada sobre a primeira ferramenta utilizada no processo, a qual possuía uma cobertura com grãos abrasivos de tamanho 140/170 MESH, ou aproximadamente D150 na classificação FEPA e o seu diâmetro ajustado para 11,989 mm. As demais ferramentas também foram acompanhadas com as mesmas variáveis de entrada C, D e E, utilizadas para a primeira ferramenta, para a verificação do comportamento dos resultados do processo.

Baseando-se nas referências bibliográficas, apresentadas no capítulo 6, os parâmetros de entrada variáveis recomendados para o brunimento de curso longo com ferramentas de passe único são descritos a seguir.

- Velocidade periférica

Podem ser utilizadas, de acordo com a forma de fixação da peça e da ferramenta, velocidades periféricas entre 15 e 30 m/min.

Em sistemas com fixação da peça rígida e ferramenta articulada são, geralmente, utilizadas velocidades de corte menores devido à tendência da ferramenta apresentar movimentos de “chicoteamento” com velocidades mais altas, causados pela atuação da força centrífuga.

Quando a ferramenta é fixada rigidamente, cabendo ao dispositivo de fixação da peça a compensação do desalinhamento entre os centros da peça e da ferramenta, podem ser utilizadas faixas de velocidades periféricas mais altas, podendo chegar até 60 m/min desde que a ferramenta apresente um bom alinhamento com o fuso da máquina.

Para a realização do experimento fatorial fracionado foram selecionadas, de acordo com os dispositivos de fixação utilizados, as velocidades periféricas:

- nível baixo (-): 16 m/min;
- nível alto (+): 26 m/min.

- Velocidade axial

Para a velocidade axial da ferramenta são recomendados valores entre 0,4 e 3,5 m/min. Os valores mais altos de avanço são utilizados com valores maiores de velocidades periféricas valendo aqui também, portanto, a influência da forma de fixação da peça e da ferramenta.

Neste estudo foram utilizadas as velocidades axiais:

- nível baixo (-): 1,0 m/min;
- nível alto (+): 1,8 m/min.

- Curso

Devido à construção em forma de barril do brunidor, o comprimento da parte cilíndrica de calibragem da ferramenta fica limitada à sua porção central. Informações do fabricante, ENGIS, 1994, permitem concluir que o comprimento desta região cilíndrica é, aproximadamente, 70 mm, conforme ilustrado na figura 9.1.

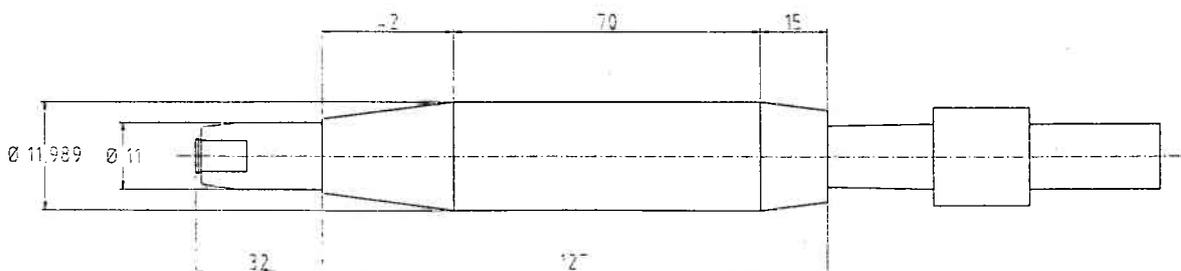


Figura 9.1 – Dimensões da ferramenta de brunir de desbaste

O curso da ferramenta situa-se entre o início da rotação da ferramenta e o retorno desta, como ilustra a figura 9.2. O limite inferior do curso foi fixado em aproximadamente $1/3$ do comprimento da região cilíndrica da ferramenta. Assim $2/3$ da região cilíndrica passam completamente pela peça calibrando o furo, além da região cônica frontal que realiza a maior retirada de material.

Dessa forma o curso da ferramenta é de cerca de 105 mm. Esse valor foi tomado como sendo o nível baixo da variável curso, sendo o nível alto definido pelo acréscimo de 7 mm no ponto morto superior e 6 mm no ponto inferior do curso menor da ferramenta. Os valores do curso selecionados para o experimento são:

- nível baixo (-): 105 mm;
- nível alto (+): 118 mm.

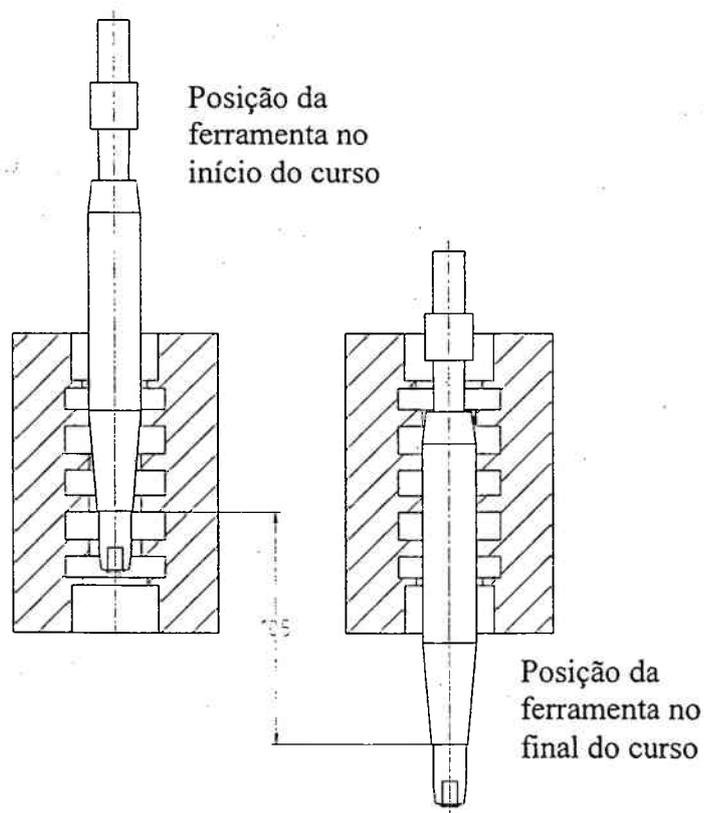


Figura 9.2 – Curso da ferramenta de brunir de passe único

Os parâmetros de entrada relativos à peça foram escolhidos de acordo com o exposto abaixo:

- Sobremetal

Segundo o exposto no capítulo 6, a quantidade de material possível de ser removido no

diâmetro do furo por ferramentas de brunimento de passe único recobertas com grãos de tamanho D150 situa-se próxima de 0,04 mm.

Para este estudo definiu-se que os valores do sobremetal são:

- nível baixo (-): $\leq 0,04$ mm;

- nível alto (+): $> 0,04$ mm.

- Erro de cilindridade inicial

O erro de cilindridade inicial pode ser corrigido pelo brunimento de passe único que utiliza ferramentas tipo bucha diamantada. Entretanto, este erro é corrigido gradualmente, através da utilização de várias ferramentas para a remoção do sobremetal do furo.

A correção do erro inicial de cilindridade depende da quantidade de material removida, da geometria externa da ferramenta e do próprio valor inicial do erro de cilindridade.

Um fator que prejudica a medição do erro de circularidade, e por conseguinte a medição do erro de cilindridade, é a altura de pico a vale da rugosidade da textura do furo. Esta dificuldade foi relatada por MILLER, 1996 e ARUNACHALAM et al., 1997 que afirmam que a altura de pico a vale da rugosidade contribui com uma significativa parcela no valor do erro de circularidade obtido.

Superfícies de furos realizados em ferro fundido através de alargamento apresentam defeitos isolados, aleatoriamente distribuídos, motivados pelo arrancamento de partículas de grafita e do material, que algumas vezes atingem profundidades de até 10 μm , os quais aparecem no perfil de circularidade como picos, ilustrado na figura 9.3.

A figura 9.4 demonstra que o efeito da rugosidade da superfície do furo na medição do erro de cilindridade é maior do que o observado na medição do erro de circularidade. Isto ocorre devido ao fato de que o valor da cilindridade é tomado como sendo a distância entre os pontos mais alto e mais baixo dos perfis de circularidade agrupados, o que é em muito prejudicado pelo aparecimento de picos.

Neste trabalho serão utilizados filtros eletrônicos, disponíveis no software de cálculo da máquina de medir erros de forma, como tentativa de amenizar a influência dos picos nos valores de circularidade e cilindridade medidos.

Visando atingir um erro de cilindridade final da ordem de 1 μm , depois da última ferramenta utilizada no processo, convencionou-se que um valor limite para a correção do erro deve estar na faixa de 8 μm . Assim, os níveis desta variável tornam-se:

- nível baixo (-): ≤ 8 μm ;

- nível alto (+): > 8 µm.

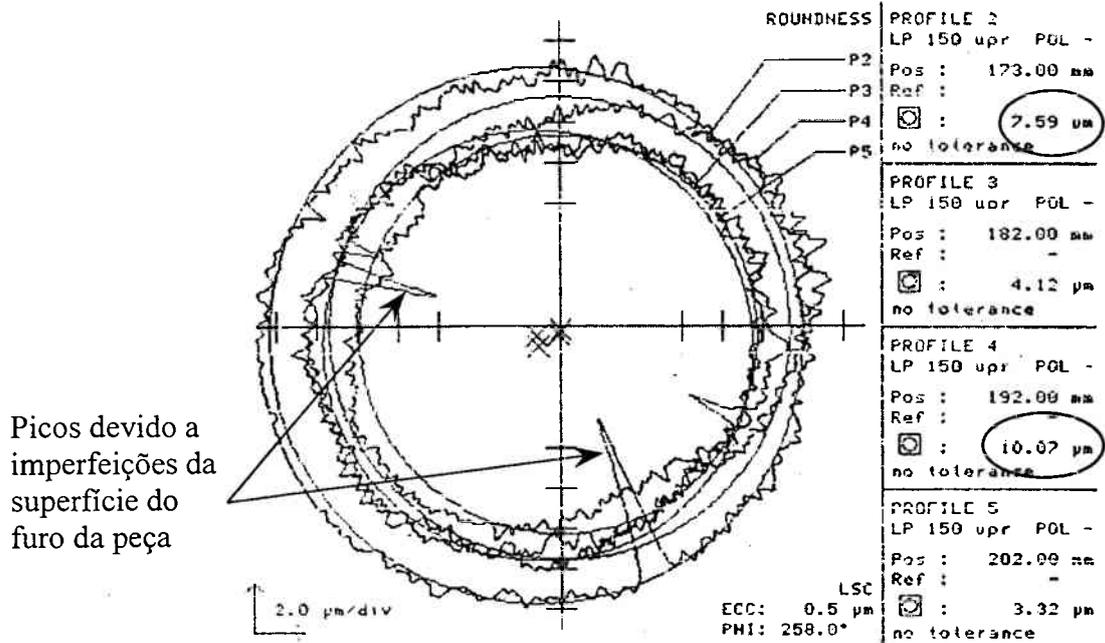


Figura 9.3 – Efeitos da rugosidade da superfície na medição do erro de circularidade

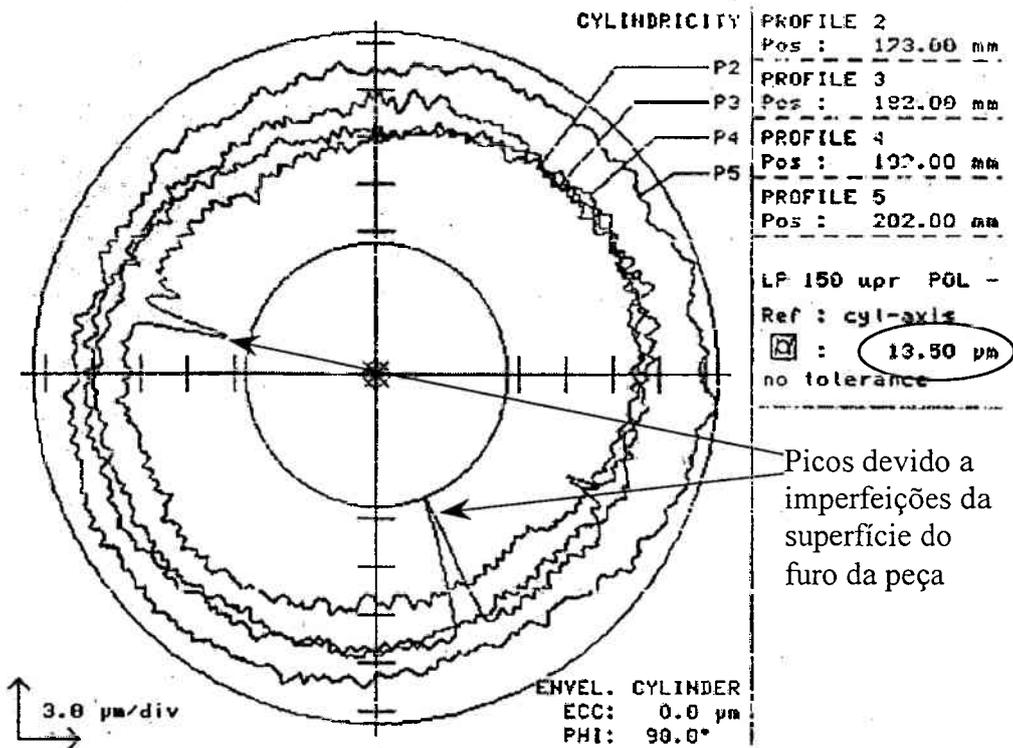


Figura 9.4 – Influência da rugosidade da superfície na medição do erro de cilindridade

O experimento fatorial fracionado 2^{5-1}_V definido na tabela 8.3, após a seleção dos parâmetros de entrada pode ser resumido como mostra a tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Resumo do planejamento do experimento fatorial

Ensaio	Tratamento	Variáveis									
		A		B		C		D		E	
		Sobremetal (mm)		Cilindricidade (μm)		Velocidade periférica (m/min)		Velocidade axial (m/min)		Curso (mm)	
1	e	-	$\leq 0,04$	-	≤ 8	-	16	-	1	+	118
2	a	+	$> 0,04$	-	≤ 8	-	16	-	1	-	105
3	b	-	$\leq 0,04$	+	> 8	-	16	-	1	-	105
4	abe	+	$> 0,04$	+	> 8	-	16	-	1	+	118
5	c	-	$\leq 0,04$	-	≤ 8	+	26	-	1	-	105
6	ace	+	$> 0,04$	-	≤ 8	+	26	-	1	+	118
7	bce	-	$\leq 0,04$	+	> 8	+	26	-	1	+	118
8	abc	+	$> 0,04$	+	> 8	+	26	-	1	-	105
9	d	-	$\leq 0,04$	-	≤ 8	-	16	+	1,8	-	105
10	ade	+	$> 0,04$	-	≤ 8	-	16	+	1,8	+	118
11	bde	-	$\leq 0,04$	+	> 8	-	16	+	1,8	+	118
12	abd	+	$> 0,04$	+	> 8	-	16	+	1,8	-	105
13	cde	-	$\leq 0,04$	-	≤ 8	+	26	+	1,8	+	118
14	acd	+	$> 0,04$	-	≤ 8	+	26	+	1,8	-	105
15	bcd	-	$\leq 0,04$	+	> 8	+	26	+	1,8	-	105
16	abcde	+	$> 0,04$	+	> 8	+	26	+	1,8	+	118

9.1.2 Seleção dos corpos de prova e realização dos ensaios

Os corpos de prova foram coletados na linha de produção da empresa Mannesmann Rexroth Automação Ltda., aleatoriamente, em diferentes turnos de trabalho. Cada corpo de prova, obtido pelo processo de alargamento com ferramentas de gume único, foi medido quanto

ao diâmetro, erro de cilindridade e rugosidade R_a e R_{max} .

A medição do diâmetro das peças determina a quantidade de material a ser retirado pela ferramenta de brunir, já que o furo das peças alargadas possui medida final em torno de 11,94 mm, com tolerância de $\pm 0,01$ mm, e o brunidor tem seu diâmetro regulado para 11,989 mm.

O erro de cilindridade foi medido com a utilização de filtros eletrônicos, presentes na máquina de medir erro de forma, específicos para a atenuação do efeito da rugosidade sobre o valor obtido.

Para que os 16 ensaios definidos com as combinações de cilindridade e sobremetal listadas na tabela 9.1 fossem satisfeitos, foram recolhidas da produção e medidas 40 peças alargadas com alargador de gume único. Cada peça recebeu um número seqüencial que permitiu o acompanhamento dos parâmetros que avaliam o resultado do trabalho até o final do processo.

A tabela 9.2 fornece as peças selecionadas, com seus respectivos valores de sobremetal, erro de cilindridade e rugosidade, já relacionadas com o experimento fatorial fracionado. Os valores mostrados nessa tabela possuem incerteza de medição, anexo 2, de 1,4 μm , 0,58 μm , 0,02 μm e 0,13 μm para o diâmetro, erro de cilindridade, rugosidade R_a e rugosidade R_{max} , respectivamente.

Os corpos de prova e as ferramentas foram fixados nos seus respectivos dispositivos, os quais encontram-se montados na máquina de brunir utilizada, conforme descrito no capítulo 8. As peças foram fixadas no dispositivo com a gravação em baixo relevo da letra “A”, figura 8.2, para cima. Dessa forma pode-se saber qual o lado de entrada e qual o lado de saída da ferramenta na peça durante o processo de brunimento.

Os ensaios foram realizados de modo aleatório numa tentativa de minimização dos erros sistemáticos na realização do experimento. Cada peça foi colocada na máquina e foram ajustados os parâmetros de corte rotação, avanço e curso, correspondentes ao tratamento indicado para a peça em questão. Então a ferramenta de desbaste (D150) era acionada e passada através do furo proporcionando um determinado resultado.

Após a primeira etapa do brunimento com a ferramenta de desbaste, as peças foram medidas para a determinação dos efeitos das variáveis sobre o resultado.

As etapas subseqüentes do processo de brunimento, ferramenta de semi-acabamento (D50) e ferramenta de acabamento (D30), também foram acompanhadas quanto ao resultado do processo apenas para comparação.

9.1.3 Resultados do processo referentes à variação do diâmetro do furo brunido

Os resultados obtidos com o experimento fatorial fracionado para o diâmetro do furo da peça são mostrados na tabela 9.3. Nesta tabela constam, além dos resultados do experimento, os diâmetros obtidos com a passagem das outras ferramentas, semi-acabamento e acabamento pelo furo, bem como a remoção de material conseguida sobre o diâmetro.

A análise dos resultados, de acordo com o definido no capítulo 8, pode ser vista na sua íntegra no anexo 5. Neste anexo podem ser encontradas, também, as medidas dos quatro pontos cuja média é tomada como a medida do diâmetro obtido de cada peça.

Tabela 9.2 – Peças selecionadas para o experimento com suas características iniciais

Trat.	Peça	A		B		C		D		E		Rugosidade (μm)				
		Sobre-metal		\varnothing	Cilind.		Veloc. perifer.		Avanço		Curso		Apalpador Mecânico		Apalpador ótico	
		(μm)		(mm)	(μm)		(m/min)		(m/min)		(mm)		R_a	R_{max}	R_a	R_{max}
e	8	31	-	11,953	6,26	-	16	-	1,0	-	118	+	0,63	4,61	1,52	15,22
a	17	43	+	11,947	5,68	-	16	-	1,0	-	105	-	0,72	5,63	1,49	14,64
b	22	33	-	11,951	8,13	+	16	-	1,0	-	105	-	1,46	10,45	2,51	25,28
abe	19	41	+	11,948	8,96	+	16	-	1,0	-	118	+	1,43	11,21	2,15	19,87
c	15	35	-	11,952	6,45	-	26	+	1,0	-	105	-	0,94	9,76	1,63	15,26
ace	28	42	+	11,947	6,94	-	26	+	1,0	-	118	+	1,36	9,41	2,37	19,95
bce	29	28	-	11,961	8,39	+	26	+	1,0	-	118	+	1,55	12,62	2,22	22,30
abc	9	42	+	11,947	10,72	+	26	+	1,0	-	105	-	0,89	6,91	1,80	18,61
d	12	37	-	11,952	5,04	-	16	-	1,8	+	105	-	0,80	7,41	1,79	18,38
ade	27	43	+	11,946	6,90	-	16	-	1,8	+	118	+	1,11	9,70	2,10	21,84
bde	20	36	-	11,953	9,00	+	16	-	1,8	+	118	+	1,32	9,03	2,58	25,09
abd	33	45	+	11,944	8,32	+	16	-	1,8	+	105	-	0,80	6,90	1,60	15,48
cde	10	38	-	11,951	6,26	-	26	+	1,8	+	118	+	0,66	6,08	1,48	16,03
acd	3	42	+	11,947	7,71	-	26	+	1,8	+	105	-	1,27	8,82	6,84	19,91
bcd	4	36	-	11,953	9,46	+	26	+	1,8	+	105	-	1,21	9,53	2,45	25,95
abcde	7	45	+	11,947	8,55	+	26	+	1,8	+	118	+	1,40	10,85	2,14	20,38

A plotagem das estimativas dos efeitos no gráfico de probabilidade normal mostra que o

único efeito significativo é o efeito A, sobremetal. Os demais efeitos são desprezíveis pois, como visto no capítulo 8, possuem médias iguais e se distribuem ao longo de uma linha reta no gráfico de probabilidade normal, figura 9.5.

Tabela 9.3 – Resultados obtidos nas medidas do diâmetro e a remoção de material no diâmetro do furo para cada ferramenta utilizada (IM = ± 0,0014 μm)

Tratam.	Peça	A - Valores iniciais		Ferramenta D150		Ferramenta D50		Ferramenta D30	
		Sobremetal teórico (mm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)	Remoção (mm)	Diâmetro (mm)	Remoção (mm)	Diâmetro (mm)	Remoção (mm)
e	8	0,031	11,958	11,986	0,028	11,998	0,012	12,001	0,003
a	17	0,043	11,946	11,980	0,034	11,996	0,016	12,002	0,006
b	22	0,033	11,956	11,986	0,030	12,000	0,014	12,002	0,002
abe	19	0,041	11,948	11,981	0,033	11,997	0,016	12,001	0,004
c	15	0,035	11,954	11,985	0,031	11,998	0,013	12,000	0,002
ace	28	0,042	11,947	11,982	0,035	11,998	0,016	12,002	0,004
bce	29	0,028	11,961	11,987	0,026	11,997	0,010	12,001	0,004
abc	9	0,042	11,947	11,981	0,034	11,997	0,016	12,002	0,005
d	12	0,037	11,952	11,984	0,032	11,997	0,013	12,001	0,004
ade	27	0,043	11,946	11,982	0,036	11,997	0,015	12,001	0,004
bde	20	0,036	11,953	11,986	0,033	11,997	0,011	12,001	0,004
abd	33	0,045	11,944	11,980	0,036	11,997	0,017	12,001	0,004
cde	10	0,038	11,951	11,983	0,032	11,998	0,015	12,000	0,002
acd	3	0,042	11,947	11,982	0,035	11,997	0,015	12,001	0,004
bcd	4	0,036	11,953	11,984	0,031	11,997	0,013	12,001	0,004
abcde	7	0,045	11,944	11,981	0,037	11,998	0,017	12,001	0,003

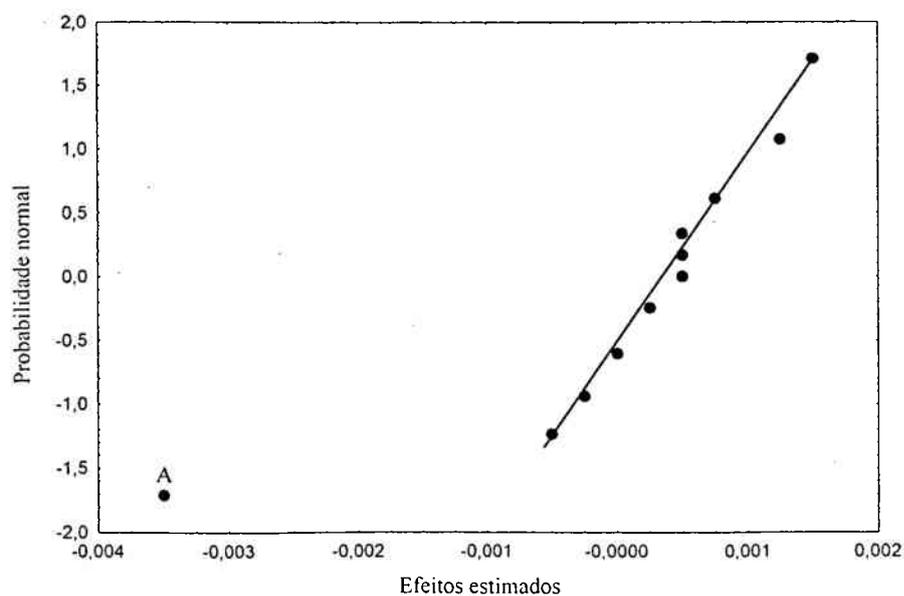


Figura 9.5 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o diâmetro do furo

A análise de variância para os dados obtidos demonstra a influência dominante que possui o sobremetal sobre o diâmetro final do furo, tabela 9.4.

Tabela 9.4 – Análise de variância para o efeito significativo “A” sobre o resultado do diâmetro do furo

Variação	Soma quad.	Graus de liberd.	Quadrado médio	F_0	NS
A	0,00006	1	0,00006	50,48	1%
Erro	0,00002	14	0,000001		
Total	0,00008	15			

O valor de F_0 calculado comparado com o valor de F_{crit} tabelado, cujo valor corresponde a $F_{0,05;1;14} = 4,60$, demonstra que a hipótese H_0 (todos os tratamentos tem médias iguais) deve ser rejeitada, com uma confiabilidade de 95%. Assim, o tratamento “A” apresenta diferença significativa dos demais sendo que este nível de significância, NS, ainda é verificado para uma confiabilidade de 99%.

A soma dos quadrados do modelo, $SS_{Modelo} = SS_A = 0,00006$, revela que este valor representa 78,29 % da variabilidade total do experimento, demonstrando que o modelo é satisfatório e comprovando que o efeito do sobremetal no diâmetro é significativo.

A figura 9.6 representa a influência dos níveis do fator “A”, sobremetal, sobre o diâmetro do furo.

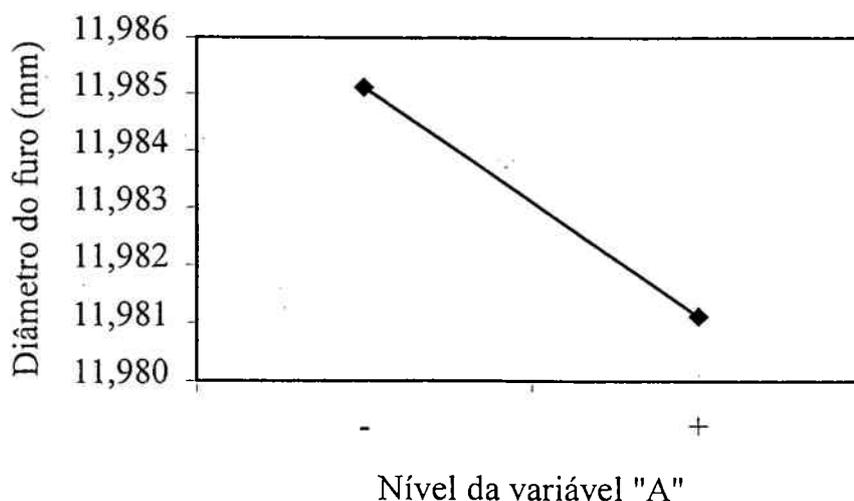


Figura 9.6 – Efeito dos níveis da variável sobremetal sobre o diâmetro do furo

Da figura 9.6 pode-se ver claramente que quando a variável sobremetal está no seu nível mais alto são obtidos diâmetros de furos menores do que os alcançados com o sobremetal em nível baixo.

Este efeito pode ser explicado pela deformação elástica do material da peça e/ou da ferramenta. Quando a ferramenta passa por um furo que possui uma maior quantidade de material a ser removido, ocorre a expansão da peça e a contração da ferramenta em um maior grau do que quando o sobremetal é menor. Tal efeito também foi observado nos trabalhos de PERES, 1994 e MILLER, 1996.

Entretanto, da tabela 9.3 pode-se verificar que apesar da maior quantidade de sobremetal produzir furos com diâmetros menores após a passagem da ferramenta de desbaste, de acordo com a seqüência do processo, utilização das ferramentas de semi-acabamento e de acabamento, o diâmetro médio vai sendo corrigido. Após a passagem da ferramenta de acabamento as medidas do diâmetro médio tendem a aproximar-se do valor 12,001 mm, enquanto que a diferença entre os valores apresentados pelas peças se encontra na ordem da incerteza de medição da máquina de medir por coordenadas utilizada, que é de 1,4 μm .

Apesar da análise de variância acusar o sobremetal como único fator de influência no diâmetro do furo produzido, uma observação detalhada nos valores individuais dos diâmetros dos quatro colos medidos, anexo 5, revela que algumas peças são produzidas com o formato de ampulheta, figura 9.7.

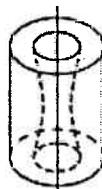


Figura 9.7 – Furo com formato de ampulheta

Este tipo de defeito pode ter as seguintes causas, de acordo com MARVIN, 1998:

- rotação do fuso inicia com a ferramenta pouco guiada no furo e o ponto de retorno muito profundo;
- ferramenta está cortando muito agressivamente;
- ferramenta está cortando em ângulo;
- peça não está bem fixada;
- velocidade tangencial da ferramenta muito alta;

- fixação está impondo muita tensão na parte de baixo do furo;
- formato de ampulheta do furo proveniente da operação de usinagem anterior muito grande;
- velocidade axial muito baixa.

Dos dados do anexo 5 obtém-se que esse formato defeituoso é mais pronunciado quando a variável curso está em seu nível mais alto, como mostrado na figura 9.8.

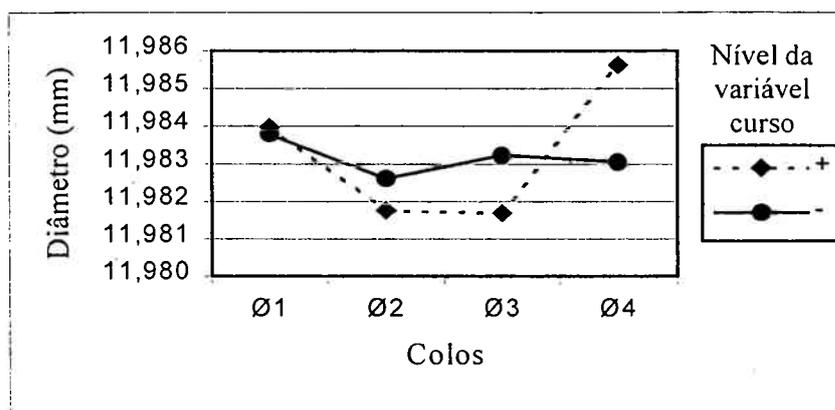


Figura 9.8 – Efeito do curso da ferramenta sobre o diâmetro dos colos da peça

Assim pode-se assumir que este defeito é causado pelo início da rotação do fuso com a ferramenta pouco engajada no furo e pelo ponto de retorno da ferramenta estar situado muito profundamente. O efeito de “chicoteamento” da ferramenta provoca a abertura do diâmetro nas extremidades do furo, como demonstra a figura 9.9. Esse efeito do curso sobre o diâmetro dos colos da peça não foi detectado pela análise de variância porque foi mascarado pela média dos valores dos diâmetros individuais.

A geometria da peça contribui para a ocorrência deste defeito, uma vez que a área dos colos é pequena para garantir uma boa guia para a ferramenta no início e no final do curso.

9.1.4 Resultados do processo referentes ao erro de circularidade do furo brunido

Os resultados obtidos com o experimento fatorial fracionado para a cilindridade do furo das peças são mostrados na tabela 9.5. Os valores do erro de circularidade obtidos para as demais ferramentas, semi-acabamento e acabamento, também podem ser vistos nesta tabela.

O anexo 5 mostra a análise dos resultados através da análise de variância. Neste anexo podem ser encontradas, também, as medidas dos erros de circularidade obtidas nos quatro colos da peça. A média dos colos é tomada como a medida do erro de circularidade de cada peça.

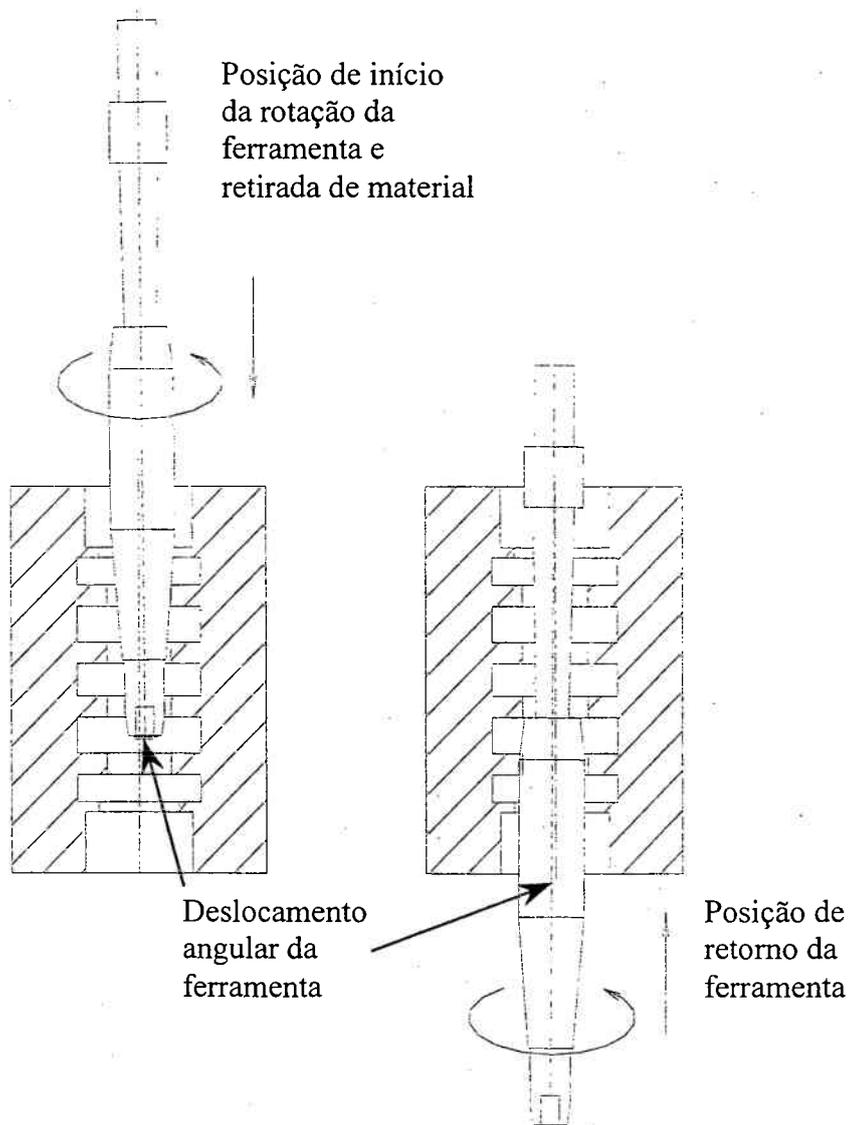


Figura 9.9 – Efeito de “chicoteamento” da ferramenta devido ao curso e à área de apoio

Os efeitos significantes, obtidos da plotagem no gráfico de probabilidade normal, são os efeitos D (velocidade axial), B (cilindricidade inicial) e E (curso). A figura 9.10 ilustra a plotagem dos efeitos no gráfico de distribuição normal.

Tabela 9.5 – Resultados obtidos nas medidas do erro de circularidade do furo (IM = ± 0,29 μm)

Tratam.	Peça	Valores iniciais	Ferramenta D150	Ferramenta D50	Ferramenta D30
		Circularidade (μm)	Circularidade (μm)	Circularidade (μm)	Circularidade (μm)
e	8	3,17	2,78	1,41	0,74
a	17	4,00	2,38	0,97	0,46
b	22	6,80	2,99	1,67	0,79
abe	19	5,02	2,64	1,45	0,69
c	15	3,75	2,71	1,20	0,45
ace	28	4,98	2,81	1,81	0,67
bce	29	5,06	2,96	1,12	0,58
abc	9	5,75	3,57	1,77	0,82
d	12	2,67	2,73	1,37	0,81
ade	27	4,94	2,92	1,55	0,54
bde	20	6,20	3,36	1,06	0,51
abd	33	5,29	3,05	1,20	0,60
cde	10	4,11	2,88	1,54	0,58
acd	3	5,26	3,18	1,59	0,76
bcd	4	3,88	3,05	1,47	1,22
abcde	7	5,64	2,92	1,32	0,63

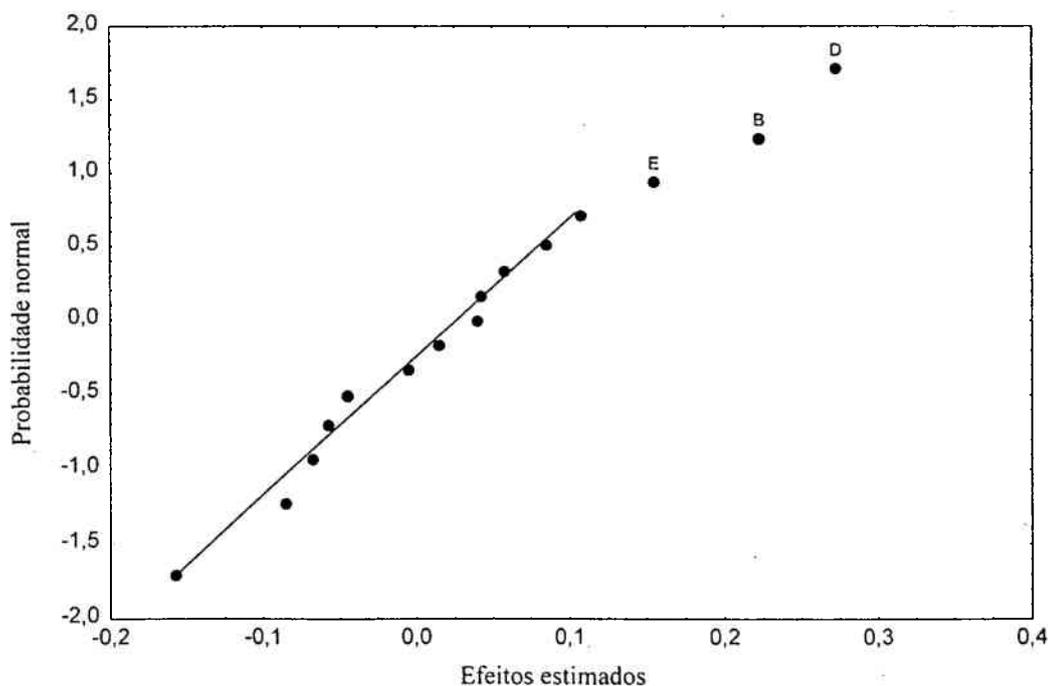


Figura 9.10 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o erro de circularidade do furo

A análise de variância para os efeitos significantes pode ser visualizada na tabela 9.6.

Tabela 9.6 – Análise de variância para os efeitos significativos sobre o erro de circularidade do furo

Varição	Soma Quad	GL	Média Quad.	Fo	NS
D	0,30	1	0,30	13,32	1%
B	0,20	1	0,20	8,88	5%
E	0,11	1	0,11	4,93	5%
Error	0,27	12	0,02		
Total	0,87	15			

O valor de F_{crit} para uma confiabilidade de 95% e com 1 grau de liberdade para o numerador e 12 graus de liberdade para o divisor é: $F_{0,05;1;12} = 4,75$. Assim a hipótese H_0 que determina que todos os tratamentos possuem médias iguais, deve ser rejeitada. Além disso, o efeito velocidade axial (D) apresenta nível de significância, NS, de 1%, ou seja uma confiabilidade de 99%.

A soma dos quadrados do modelo, $SS_{Modelo} = SS_D + SS_B + SS_E = 0,61$, revela que este valor representa 70 % da variabilidade total do experimento.

A figura 9.11 representa a influência dos níveis dos fatores “D”, velocidade axial, “B”, erro de cilindridade inicial e “E”, curso sobre o erro de circularidade do furo.

Como pode ser visto na figura 9.11, os níveis altos das variáveis significantes ocasionam valores de erro de circularidade do furo mais altos.

A influência da variável “curso” possui as mesmas causas das observadas anteriormente para o diâmetro do furo. Cursos maiores fazem com que a ferramenta sofra o efeito de “chicoteamento”, conforme ilustrado na figura 9.9, devido à pequena área de apoio e provoque um maior erro de circularidade nas extremidades do furo, de acordo com os valores do erro de circularidade dos colos dispostos no anexo 5.

Velocidades axiais elevadas também podem ocasionar o aumento do erro de circularidade, principalmente devido ao tipo de fixação da ferramenta empregada neste trabalho. Uma menor relação entre velocidade periférica e velocidade axial ocasiona um menor tempo disponível para a retirada da mesma quantidade de material. A ferramenta ao encontrar uma maior resistência ao seu avanço axial provoca o tombamento do conjunto dispositivo de fixação-ferramenta, conforme ilustra a figura 5.11.

Entretanto, como a variável velocidade e a interação das variáveis velocidade e avanço não foram detectadas como significantes, pode-se concluir que os níveis da variável velocidade utilizados, tanto o alto como o baixo, são suficientes para causar o efeito de “chicoteamento” da ferramenta devido às forças centrífugas envolvidas.

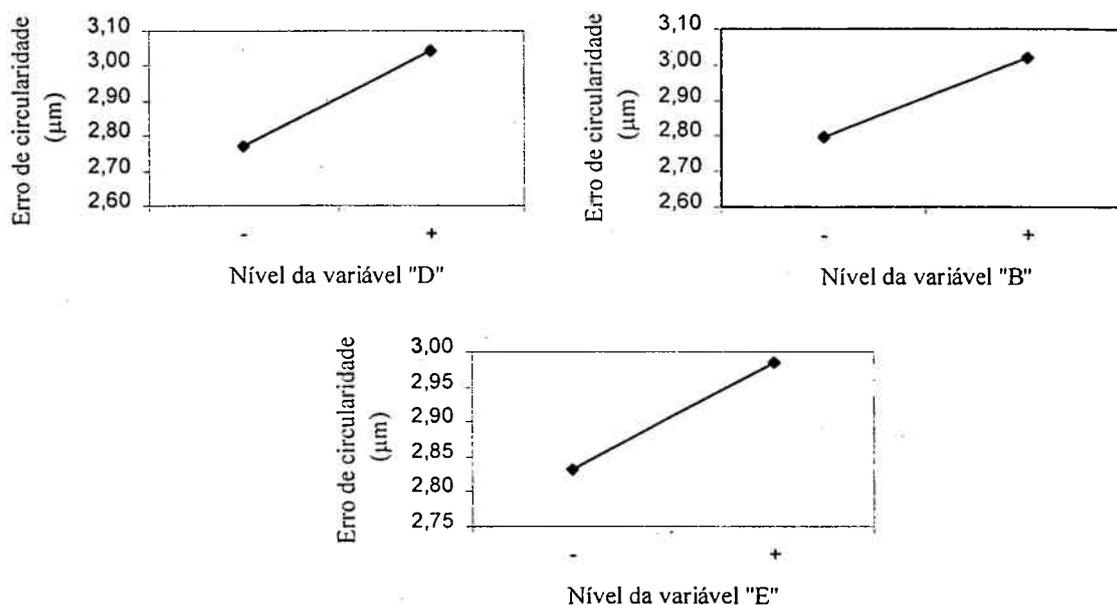


Figura 9.11 – Efeito dos níveis das variáveis velocidade axial (D), erro de cilindricidade inicial (B) e curso (E) sobre o erro de circularidade do furo

O efeito do erro de cilindricidade inicial sobre o erro de circularidade parece ser óbvio, uma vez que a obtenção do valor da cilindricidade é realizada através das medições dos erros de circularidade nos quatro colos do furo. Assim, valores maiores de erros de cilindricidade inicial, ou seja, de circularidade, não são corrigidos na mesma proporção do que quando o erro de cilindricidade inicial é menor. Além disso, o maior erro de cilindricidade inicial pode resultar em uma maior retirada de material em um dos lados do furo, desbalanceando as forças de corte e afetando o erro de circularidade, como observado em seu trabalho experimental por ARUNACHALAM et al., 1997.

A passagem das outras ferramentas pelo furo revela a tendência de correção do erro de circularidade proporcionada pelo processo de brunimento.

9.1.5 Resultados do processo referentes ao erro de cilindridade do furo brunido

Para o erro de cilindridade foram obtidos, através do experimento fatorial fracionado, os dados constantes na tabela 9.7

Tabela 9.7 – Resultados obtidos nas medidas do erro de cilindridade do furo para cada ferramenta utilizada (IM = $\pm 0,58 \mu\text{m}$)

Tratam.	Peça	Valores iniciais	Ferramenta D150	Ferramenta D50	Ferramenta D30
		Cilindridade (μm})	Cilindridade ($\mu\text{m}$)	Cilindridade ($\mu\text{m}$)	Cilindridade ($\mu\text{m}$)
e	8	6,26	3,97	3,51	1,83
a	17	5,68	3,32	1,91	1,03
b	22	8,13	4,65	3,20	1,68
abe	19	8,96	4,73	2,33	1,26
c	15	6,45	4,35	1,95	1,03
ace	28	6,94	4,16	3,78	1,72
bce	29	8,39	4,04	2,02	1,07
abc	9	9,46	4,96	4,58	1,83
d	12	5,04	3,62	3,09	1,87
ade	27	6,90	4,12	3,59	1,30
bde	20	9,00	4,69	2,21	1,11
abd	33	8,32	4,31	2,25	1,22
cde	10	6,26	4,27	2,94	0,99
acd	3	7,71	4,12	3,43	1,45
bcd	4	10,72	4,84	4,50	4,50
abcde	7	8,55	4,39	2,29	1,49

A plotagem dos efeitos, anexo 5, demonstra que as variáveis significantes para o erro de cilindridade final são o erro de cilindridade inicial (B), a velocidade periférica (C), a interação entre os fatores cilindridade inicial e curso (BE), a interação entre o erro de cilindridade inicial e a velocidade periférica (BC) e a interação entre os fatores velocidade tangencial e curso (CE), conforme mostra a figura 9.12.

A análise de variância para os efeitos significativos, tabela 9.8, revela que os efeitos mais significantes, com nível de significância de 1%, são a cilindridade inicial e a interação entre velocidade periférica e curso. O valor de F_{crit} para uma confiabilidade de 95%, $F_{0,05;1;10} = 4,96$ e

para uma confiabilidade de 99%, $F_{0,01;1; 10} = 10,04$, determinam que a hipótese H_0 , todos os tratamentos possuem média iguais, deve ser rejeitada.

A soma dos quadrados do modelo, $SS_{\text{modelo}} = SS_B + SS_C + SS_{BE} + SS_{BC} + SS_{CE}$, abrange 92 % da variabilidade total do erro de cilindridade final.

A figura 9.13 representa a influência dos níveis dos fatores principais significantes, “B” e “C”, e dos das interações de segunda ordem significantes, “BE”, “BC” e “CE”, sobre o erro de cilindridade final do furo.

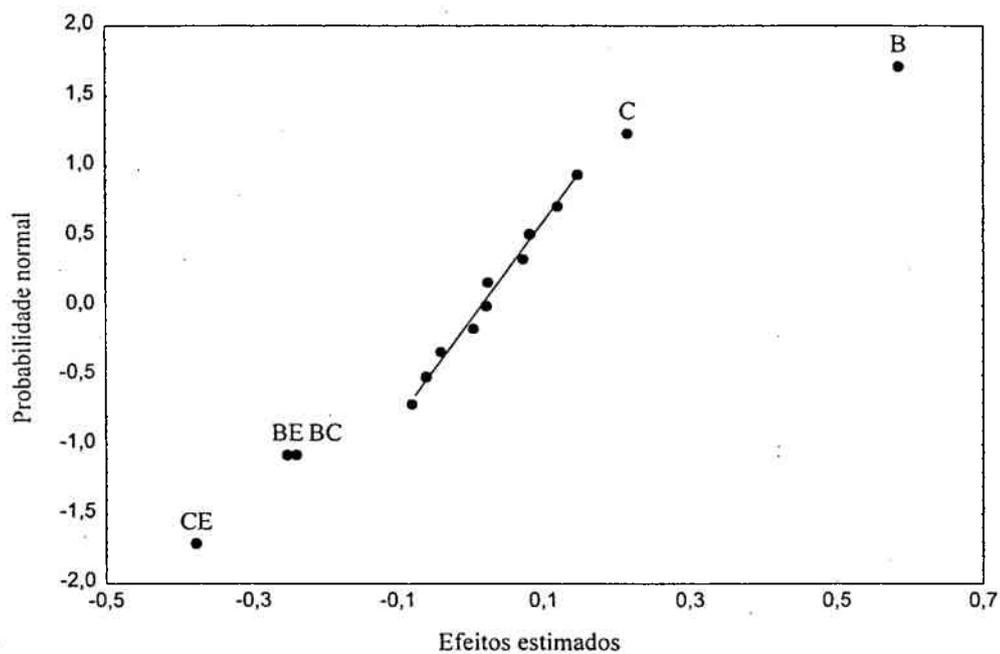


Figura 9.12 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre o erro de cilindridade do furo

Tabela 9.8 – Análise de variância para os efeitos significativos “B”, “C”, “BE”, “BC” e “CE” sobre o resultado da cilindridade do furo

Varição	Soma quad.	G.L.	Quadrado médio	F_0	NS
B	1,37	1	1,37	56,13	1%
C	0,20	1	0,20	8,09	5%
BE	0,26	1	0,26	10,46	1%
BC	0,26	1	0,26	10,46	1%
CE	0,57	1	0,57	23,37	1%
Erro	0,24	10	0,02		
Total	2,89	15			

Verifica-se que o erro de cilindridade inicial e a velocidade tangencial em seus níveis altos provocam a obtenção de furos com maiores erros de cilindridade final.

Erros de cilindridade inicial maiores não são corrigidos pela passagem de apenas uma ferramenta pelo furo, da mesma forma que observado para os erros de circularidade, sendo gradativamente corrigidos com a utilização das ferramentas de semi-acabamento e de acabamento.

Nota-se, entretanto, que a correção do erro de cilindridade não foi verificada para uma das peças, peça 4 da tabela 9.7, a qual possuía o maior erro de cilindridade inicial do experimento. Pode-se afirmar que a correção do erro de cilindridade depende de um determinado valor inicial, bem como do formato do erro cilíndrico inicial do furo da peça, para poder ser efetuada. Maiores erros de cilindridade podem ser corrigidos através da passagem de um maior número de ferramentas, o que exigiria uma maior quantidade de sobremetal no furo a ser brunido.

A variável “velocidade periférica” em seu nível baixo e a interação entre a velocidade tangencial e o curso, com ambos os fatores nos seus níveis baixos, provocam o menor erro de cilindridade. O efeito do nível destas variáveis está ligado ao já exposto anteriormente efeito de “chicoteamento” da ferramenta, causado pelo aumento da rotação e pela fixação da ferramenta e pela pequena área de suporte da ferramenta proporcionada pelo furo da peça quando o curso se encontra em níveis altos, figura 9.9.

Entretanto, os maiores erros de cilindridade são obtidos com a variável velocidade tangencial no nível alto e a variável curso no nível baixo. Esta relação parece contradizer as razões para os menores erros de cilindridade obtidos nos níveis baixos destes fatores.

O efeito da interação erro de cilindridade inicial e curso ocasiona maiores erros de cilindridade final quando ambos fatores se encontram em níveis altos, enquanto que, quando se encontram em níveis baixos, provocam menores erros de cilindridade inicial. O efeito do erro de cilindridade inicial alto em conjunto com maiores cursos causa, além da insuficiente correção do erro de forma com apenas uma ferramenta, a instabilidade da ferramenta ao passar pelo furo devido à pequena área de apoio, figura 9.9.

Este também é o motivo para a ocorrência de maiores erros de cilindridade com níveis altos de cilindridade inicial e velocidade periférica, interação BC.

O efeito da variável velocidade axial, fator de significância no erro de circularidade, também era esperado no erro de cilindridade devido ao exposto naquele item, contudo, não se

revelou fator influente, contrariando o exposto por KÖNIG, 1989, que menciona o tombamento da ferramenta ser mais prejudicial ao erro de cilindricidade do que para o erro de circularidade.

Durante o experimento verificou-se que algumas medições de circularidade e cilindricidade sofreram o efeito da ocorrência de picos devido à rugosidade do furo, mesmo com a utilização dos filtros eletrônicos disponíveis na máquina de medir erro de forma. É de difícil determinação, porém, o quanto este defeito interferiu nos resultados.

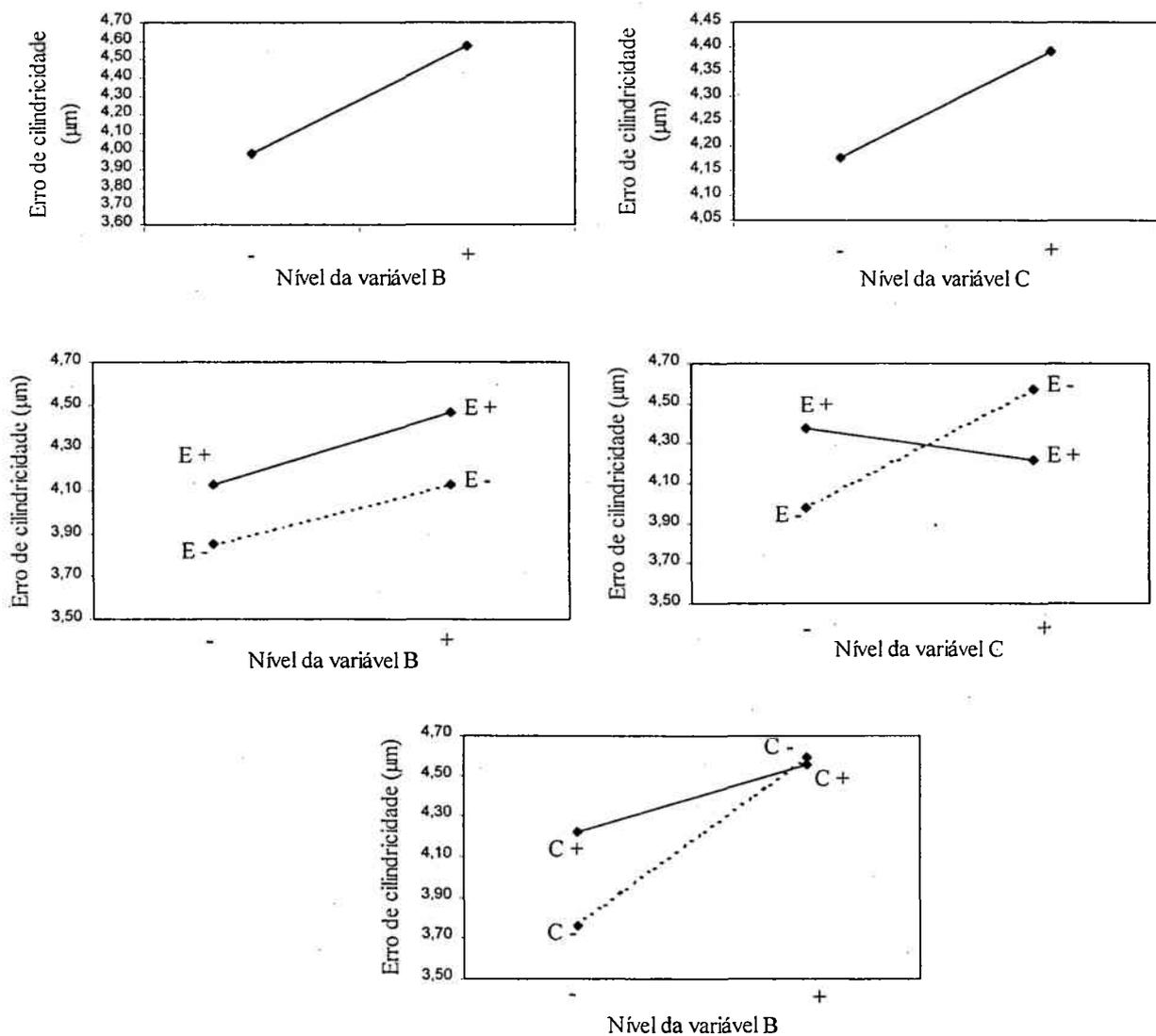


Figura 9.13 – Efeito dos níveis das variáveis significantes sobre o erro de cilindricidade do furo

9.1.6 Resultados do processo referentes à rugosidade do furo brunido

As médias dos valores da rugosidade R_a e da rugosidade R_z dos colos, medidos com

apalpador mecânico, podem ser vistas na tabela 9.9. Na tabela 9.10 são apresentadas as medidas obtidas com apalpador ótico.

Nota-se que há uma grande dependência do valor da rugosidade, R_a e R_z , com o tamanho do grão de diamante que a ferramenta possui. Tanto para o apalpador mecânico quanto para o apalpador ótico os valores da rugosidade diminuem com a diminuição do tamanho de grão do diamante, sendo este fato desejável e previsto.

Em algumas peças o acabamento superficial inicial, furo alargado, é menor que o acabamento após a passagem da ferramenta de desbaste, reforçando a relação de dependência do acabamento com o tamanho do grão abrasivo.

Como era de se esperar, também, os valores de rugosidade medidos com o apalpador ótico mostraram-se muito superiores aos obtidos com o apalpador mecânico. Isto pode ser explicado devido ao reduzido diâmetro de foco do feixe LASER que realiza a varredura na superfície no apalpador ótico, 1 μm , em comparação ao raio do diamante do apalpador mecânico, 5 μm , ilustrado na figura 6.4.

Tabela 9.9 – Valores de rugosidade R_a (IM = $\pm 0,02 \mu\text{m}$) e rugosidade R_z (IM = $\pm 0,10 \mu\text{m}$) obtidos com apalpador mecânico

Tratam.	Peça	Valores iniciais	Ferramenta D150	Ferramenta D50	Ferramenta D30	Valores iniciais	Ferramenta D150	Ferramenta D50	Ferramenta D30
		R_a (μm)	R_z (μm)						
e	8	0,63	1,31	0,46	0,18	3,71	7,01	3,00	1,39
a	17	0,72	1,19	0,43	0,17	4,06	6,58	2,79	1,18
b	22	1,46	1,25	0,44	0,16	8,24	6,88	2,91	1,24
abe	19	1,43	1,33	0,42	0,19	8,27	7,52	2,62	1,53
c	15	0,94	1,24	0,42	0,18	6,19	6,59	2,76	1,25
ace	28	1,36	1,27	0,42	0,18	7,67	6,62	2,94	1,37
bce	29	1,55	1,18	0,49	0,19	8,61	6,86	3,12	1,34
abc	9	0,89	1,18	0,49	0,19	5,19	6,27	3,04	1,47
d	12	0,80	1,31	0,43	0,19	5,18	7,15	2,81	1,31
ade	27	1,11	1,26	0,45	0,18	7,00	6,61	2,90	1,31
bde	20	1,32	1,40	0,45	0,18	6,94	7,04	2,84	1,36
abd	33	0,80	1,39	0,49	0,20	5,29	7,23	3,17	1,51
cde	10	0,66	1,28	0,47	0,18	4,26	6,89	3,18	1,29
acd	3	1,27	1,20	0,47	0,20	7,16	6,42	3,25	1,36
bcd	4	1,21	1,32	0,43	0,15	6,96	7,50	2,76	1,17
abcde	7	1,40	1,28	0,43	0,16	7,82	6,80	2,81	1,16

O anexo 5 mostra a análise de variância dos dados de rugosidade de superfície obtidos para o experimento fatorial.

a) Fatores de influência sobre a rugosidade R_a - apalpador mecânico

Os fatores de influência sobre a rugosidade R_a , obtida com apalpador mecânico, foram a velocidade periférica (C), a velocidade axial (D) e a interação entre os fatores erro de cilindricidade inicial e velocidade axial (BD), figura 9.14.

Tabela 9.10 – Valores de rugosidade R_a (IM = $\pm 0,02 \mu\text{m}$) e rugosidade R_z (IM = $\pm 0,10 \mu\text{m}$) obtidos com apalpador ótico

Tratam.	Peça	Valores	Ferramenta	Ferramenta	Ferramenta	Valores	Ferramenta	Ferramenta	Ferramenta
		iniciais	D150	D50	D30	iniciais	D150	D50	D30
		R_a (μm)	R_z (μm)						
e	8	1,52	1,91	1,28	1,06	12,49	15,79	12,29	10,63
a	17	1,49	1,75	1,42	1,00	12,25	14,15	13,92	10,72
b	22	2,51	1,81	1,23	1,02	19,35	15,60	12,39	9,62
abe	19	2,15	1,74	1,23	1,04	16,24	15,00	12,42	11,28
c	15	1,63	1,74	1,41	1,08	12,64	16,14	13,97	12,12
ace	28	2,37	1,88	1,40	1,29	16,41	16,21	13,90	13,05
bce	29	2,22	1,89	1,38	1,03	17,19	13,95	13,04	10,63
abc	9	1,80	1,76	1,21	1,10	13,84	14,59	11,69	12,25
d	12	1,79	1,67	1,25	0,97	14,69	15,31	12,35	10,52
ade	27	2,10	1,76	1,24	1,02	16,53	15,46	11,54	9,80
bde	20	2,58	1,65	1,35	0,99	19,27	14,02	13,41	9,94
abd	33	1,60	1,99	1,23	1,00	12,94	16,28	12,65	10,08
cde	10	1,48	1,88	1,27	1,00	12,78	14,88	13,59	10,50
acd	3	2,16	1,54	1,50	0,94	17,46	14,83	16,37	9,23
bcd	4	2,45	1,48	1,44	1,24	17,81	13,35	12,80	11,93
abcde	7	2,14	1,59	1,29	1,19	16,11	12,69	13,15	11,91

A representação gráfica dos efeitos significativos sobre a rugosidade, figura 9.15, indica que menores valores de rugosidade são obtidos com maiores velocidades periféricas (C) e menores velocidades axiais (D). Esse comportamento é descrito por KÖNIG, 1989, PAULL et al., 1967 e MARVIN, 1998.

O aumento da velocidade periférica leva a um aumento do número de grãos abrasivos atuantes num mesmo comprimento usinado, proporcionando que cada grão retire um menor volume de cavaco, suavizando o corte e reduzindo a altura dos picos de rugosidade na superfície do furo e, dessa forma, diminuindo a rugosidade.

Por outro lado, velocidades axiais maiores fazem com que o número de grãos atuantes por comprimento usinado seja reduzido e ocorra um aumento da rugosidade da superfície.

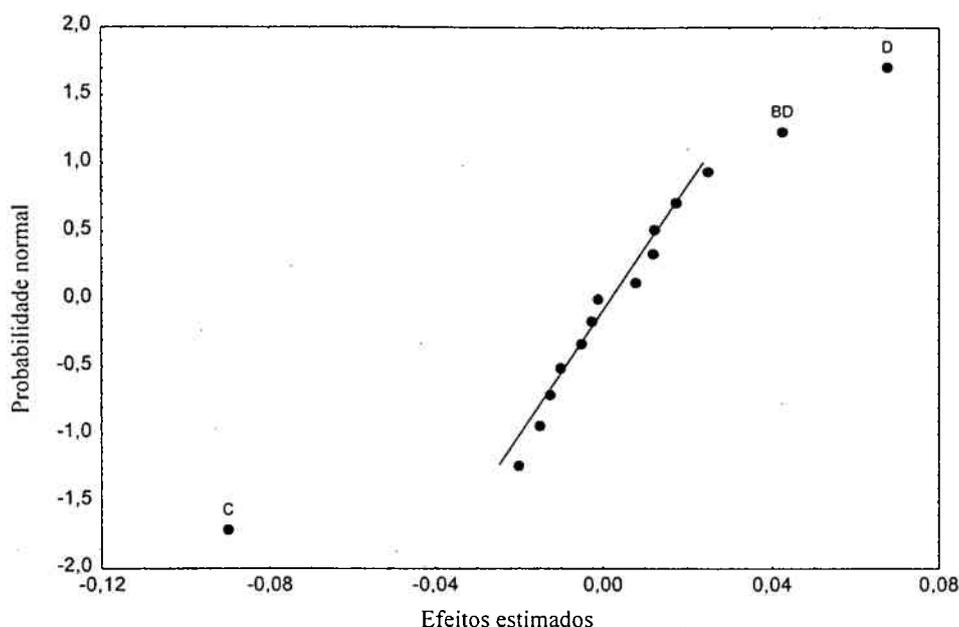


Figura 9.14 – Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_a do furo, medida com apalpador mecânico

A interação entre o erro de cilindricidade inicial (B) e velocidade axial (D) provoca o aumento da rugosidade da superfície quando se encontram em seus níveis mais altos. PERES, 1994, justificou a influência do erro de cilindricidade inicial sobre a rugosidade devido ao aumento do desvio de forma aumentar a pressão de contato, forçando os grãos a penetrarem de maneira mais agressiva na superfície do furo e assim elevando a rugosidade.

De maneira similar, o aumento do desvio de forma e o aumento da velocidade axial podem provocar, além da penetração mais agressiva dos grãos na superfície do furo, a diminuição do número de grãos ativos, como exposto anteriormente, agravando o acabamento da superfície.

b) Fatores de influência sobre a rugosidade R_z - apalpador mecânico

O gráfico de probabilidade normal dos efeitos revela que os fatores de influência sobre os valores de rugosidade R_z , obtida com apalpador mecânico, foram a velocidade periférica (C) e a interação entre os fatores velocidade e sobremetal (AC), figura 9.16.

A figura 9.17 demonstra que níveis mais altos da velocidade periférica provocam rugosidades R_z mais baixas, como observado também para a rugosidade R_a .

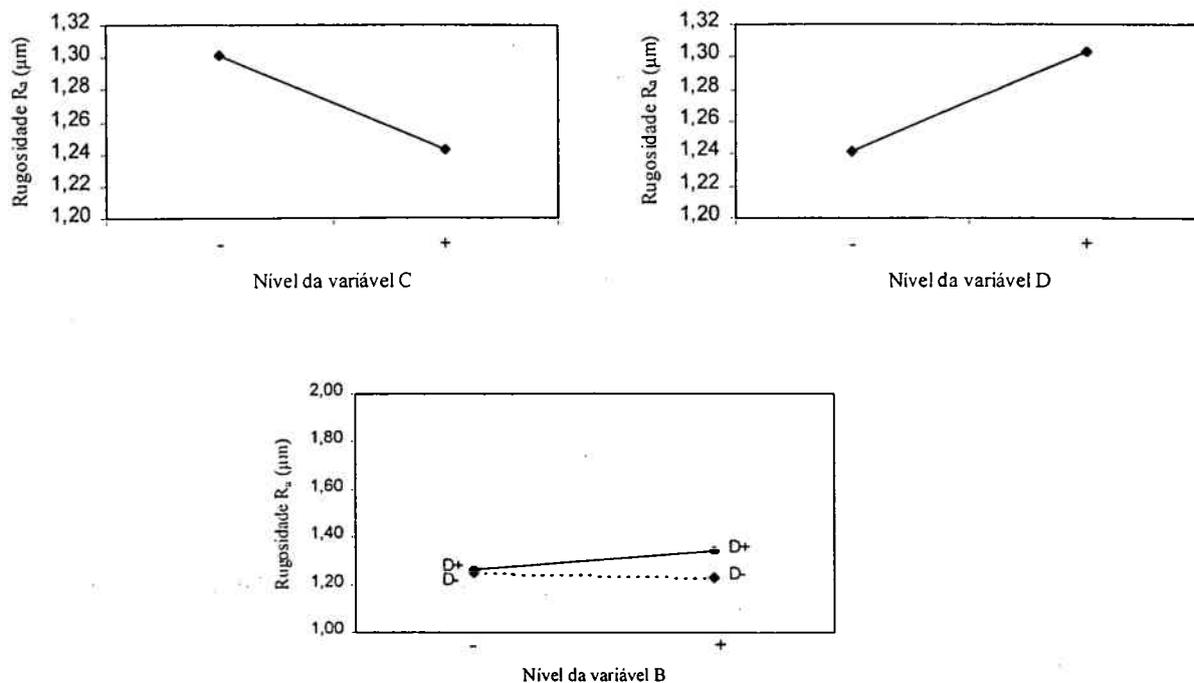


Figura 9.15 - Efeito dos níveis das variáveis significativas sobre a rugosidade R_a – apalpador mecânico

O efeito da interação entre os fatores sobremetal e velocidade periférica proporciona que sejam obtidas rugosidades menores com o nível alto da variável velocidade periférica (C) e o nível alto da variável sobremetal (A).

PERES, 1994, observou que a influência do sobremetal na rugosidade da superfície do furo é contrária à exposta na figura 9.17. Em seu trabalho o nível alto da interação das variáveis sobremetal e cilindricidade ocasiona um pior acabamento superficial devido ao aumento da pressão de contato e à maneira mais agressiva com que os grãos penetram na peça.

Entretanto, MARVIN, 1998, relaciona como uma das causas para obtenção de acabamentos superficiais com valores altos a remoção insuficiente de material, deixando de remover as marcas da usinagem anterior ao brunimento como ilustrado na figura 7.10b. Este efeito é mais pronunciado em medições de rugosidade R_z devido à definição deste parâmetro de medição de rugosidade ser mais sensível ao aparecimento de vales mais profundos na superfície em comparação com a rugosidade R_a .

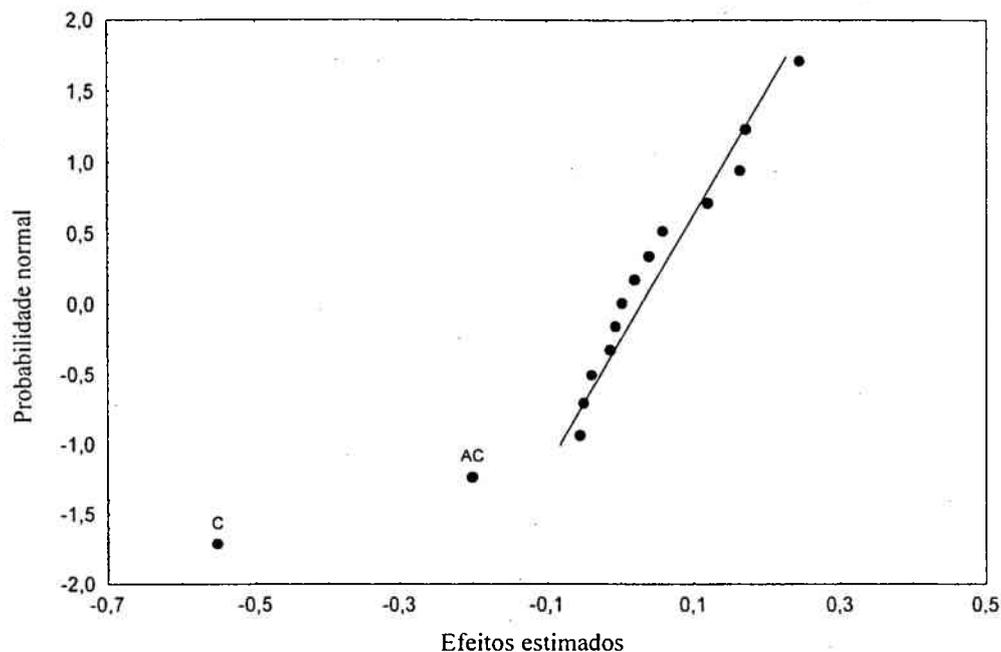


Figura 9.16 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_z do furo medida com apalpador mecânico

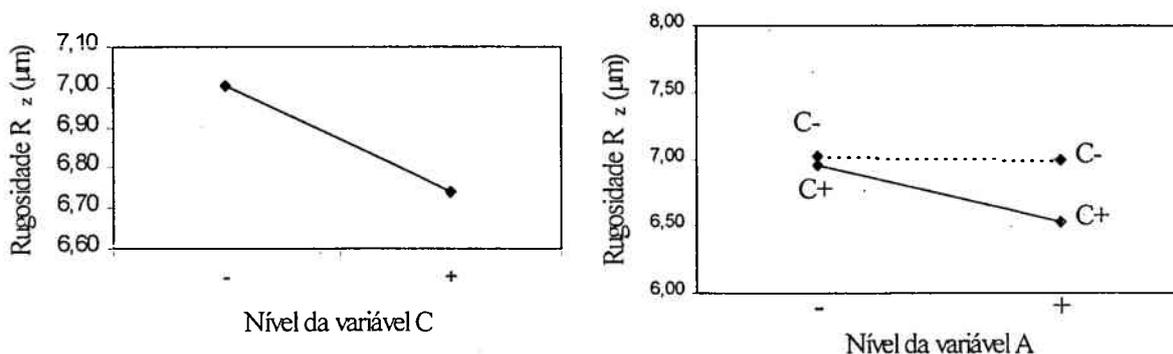


Figura 9.17 - Efeito dos níveis das variáveis significativas sobre a rugosidade R_z – apalpador mecânico

Da tabela 9.3 pode-se verificar que a remoção de material média obtida com a ferramenta de desbaste, D150, foi de $30 \mu\text{m}$. Assim, a rugosidade R_z da carcaça alargada, tabela 9.10, para evitar a reminiscência de riscos desta operação após o brunimento, deve estar na ordem de menos da metade do sobremetal, ou seja, menor que $15 \mu\text{m}$, como ilustrado na figura 9.18 (MUMMERY, 1992).

Algumas peças da tabela 9.10 apresentam rugosidade R_z para o furo alargado com valores maiores que $15 \mu\text{m}$. Nestas peças, após a passagem da ferramenta de desbaste com grãos de diamante D150, ainda poderiam restar vales produzidos pela operação anterior, alargamento.

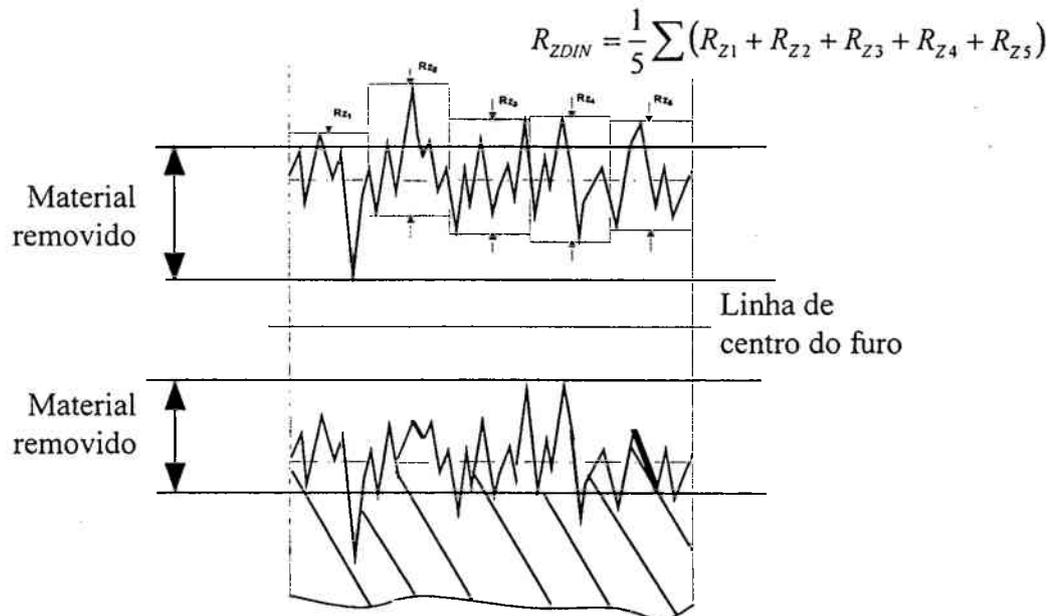


Figura 9.18 – Remoção de material do diâmetro do furo insuficiente para a eliminação de riscos provenientes da operação anterior

c) Fatores de influência sobre a rugosidade R_a - apalpador ótico

O fator de influência verificado para a rugosidade R_a , obtida com apalpador ótico, foi apenas a velocidade periférica (C), figura 9.19.

A figura 9.20, por sua vez, ilustra que os níveis altos da variável C proporcionam a obtenção de rugosidades R_a menores, confirmando os resultados encontrados para a rugosidade R_a medida com apalpador mecânico.

A justificativa para este comportamento da rugosidade R_a em relação à velocidade periférica é a mesma explanada no item 9.1.6 a). O maior número de grãos de diamante atuando num mesmo comprimento usinado proporciona aos grãos a retirada de um menor volume de cavacos, suavizando o corte e formando ranhuras menos profundas na superfície do furo e, dessa forma, diminuindo a rugosidade.

Entretanto, a análise de variância indica que a soma dos quadrados do modelo, $SS_{\text{modelo}} = SS_C$, corresponde a apenas 33 %, anexo 5, da variabilidade total dos dados do experimento. A influência da velocidade periférica sobre a rugosidade R_a , apesar de ser a maior entre os fatores, não é absoluta. Os outros fatores também contribuem para a influência da rugosidade R_a , porém, devido à influência destes estar muito distribuída, não foram detectados.

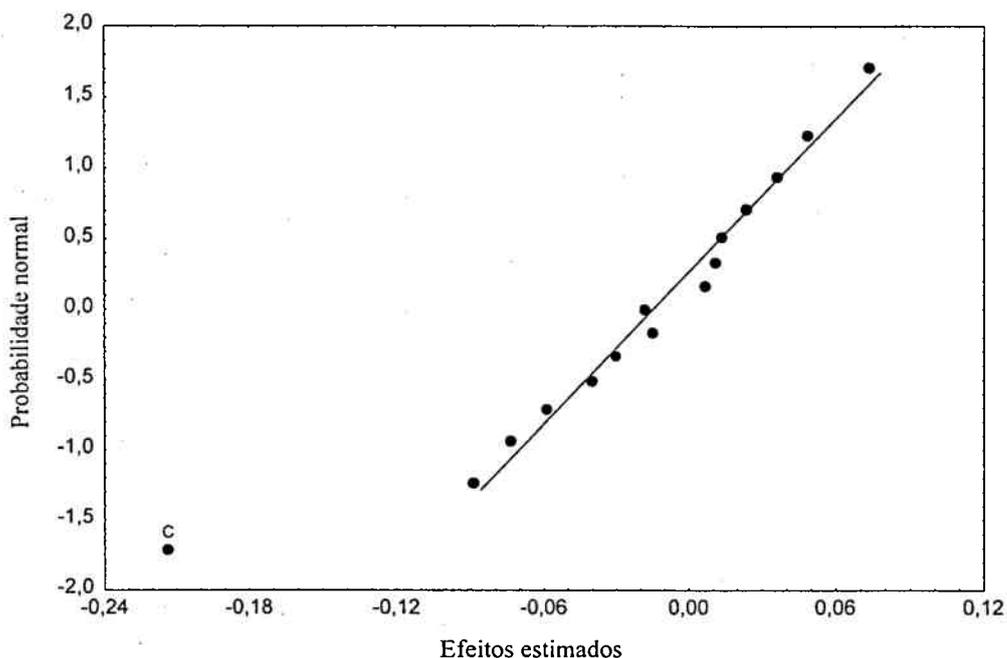


Figura 9.19 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_a do furo, medida com apalpador ótico

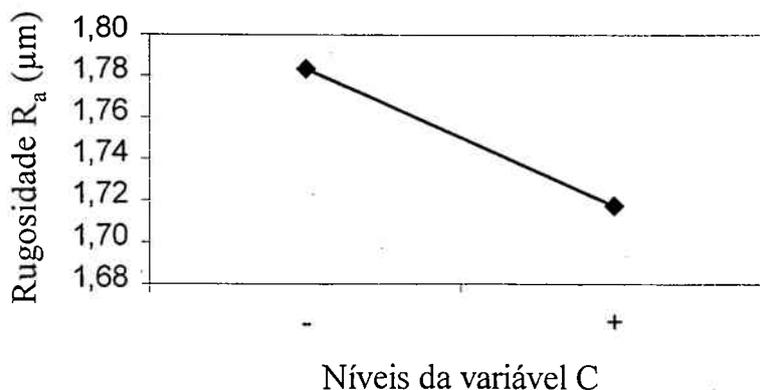


Figura 9.20 - Efeito dos níveis da variável velocidade periférica (C) sobre a rugosidade R_a – apalpador ótico

d) Fatores de influência sobre a rugosidade R_z - apalpador ótico

A plotagem no gráfico de probabilidade normal dos efeitos das variáveis revela que os fatores que possuem influência sobre a rugosidade R_z são a velocidade periférica (C) e a velocidade axial (D), figura 9.21.

A representação gráfica dos efeitos significativos sobre a rugosidade, figura 9.22, indica que menores valores de rugosidade são obtidos com maiores velocidades tangenciais (C) e menores velocidades axiais (D). Esses efeitos são os mesmos verificados para a rugosidade R_a medida com apalpador mecânico e tal comportamento possui as mesmas justificativas expostas no item 9.1.6 b).

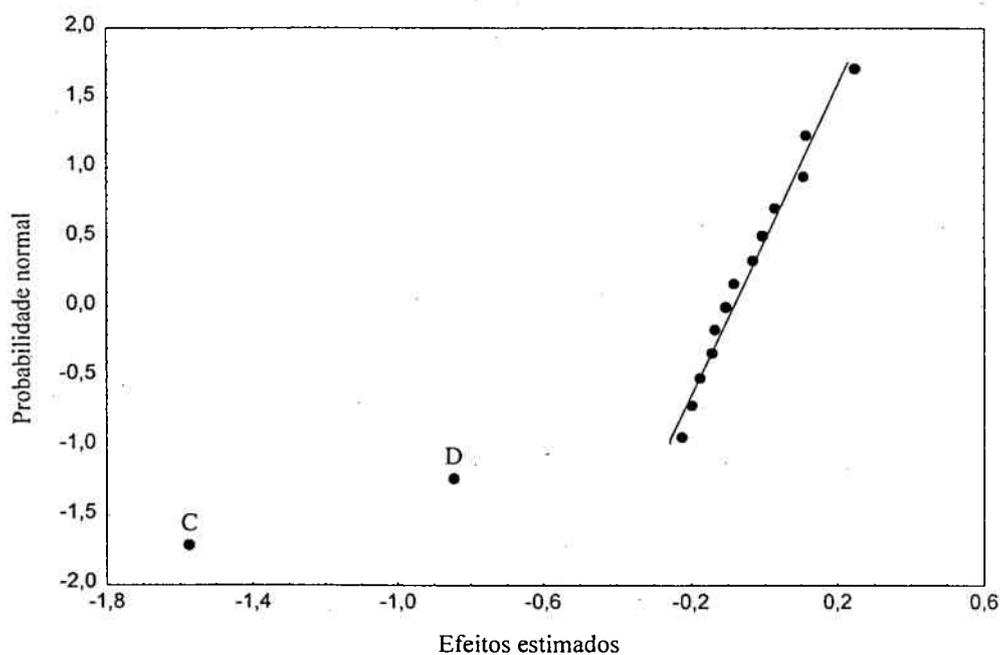


Figura 9.21 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos sobre a rugosidade R_z do furo, medida com apalpador ótico

Todavia, o efeito da interação entre os fatores sobremetal e velocidade periférica não se revelou significativo para a rugosidade R_z medida com apalpador ótico, ao contrário do que se poderia esperar. Considerando que o apalpador ótico possui uma maior sensibilidade na medição de vales, devido ao pequeno diâmetro focal, a ocorrência de defeitos provenientes da operação de alargamento deveria ser detectada com mais intensidade.

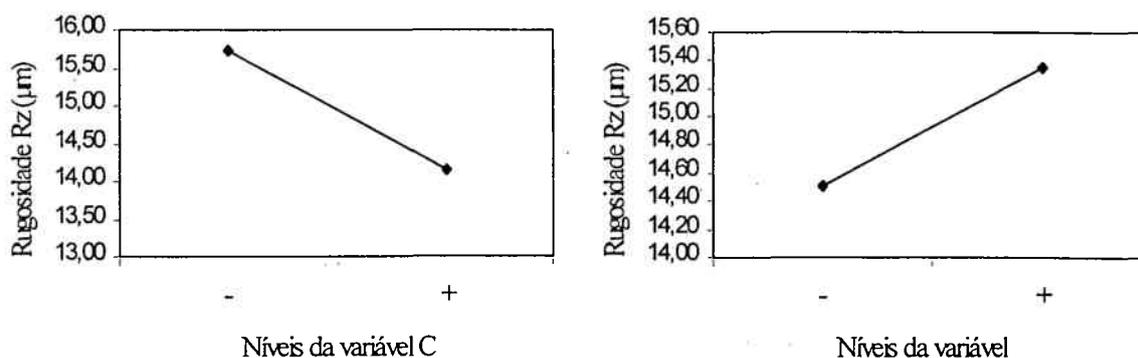


Figura 9.22 - Efeito dos níveis das variáveis velocidade periférica (C) e velocidade axial (D) sobre a rugosidade R_z – apalpador ótico

9.1.7 Resumo dos resultados do experimento

O experimento fatorial fracionado revelou que as variáveis influentes sobre os resultados do trabalho da ferramenta de desbaste podem ser resumidas como sendo:

- *Diâmetro do furo*
 - maiores quantidades de sobremetal, $> 30 \mu\text{m}$, resultam em furos com diâmetros menores;
 - curso elevado da ferramenta, 118 mm, resulta em furos com os diâmetros das extremidades maiores, provocando furos com formato de ampulheta, figura 9.7;
- *Erro de circularidade*
 - velocidades axiais maiores, 1,8 m/min, resultam em maiores erros de circularidade;
 - erros de cilindridade inicial maiores, $> 8 \mu\text{m}$, resultam em maiores erros de circularidade;
 - curso maior da ferramenta, 118 mm, resulta em erros de circularidade mais elevados.
- *Erro de cilindridade*
 - erros de cilindridade inicial maiores, $> 8 \mu\text{m}$, provocam maiores erros de cilindridade final;
 - velocidade periférica elevada, 26 m/min, resulta em maiores erros de cilindridade;
 - erro de cilindridade inicial menor, $\leq 8 \mu\text{m}$, juntamente com menores cursos, 105 mm, resulta em menores erros de cilindridade;
 - a interação entre velocidade periférica baixa, 16 m/min, e curso pequeno, 105 mm, resulta em erros de cilindridade menores;

- a interação entre erro de cilindridade pequeno, $\leq 8 \mu\text{m}$, e velocidade periférica baixa resulta em menor erro de cilindridade.

- *Rugosidade R_a*

- maiores velocidades periféricas resultam em menores valores de rugosidade R_a ;
- velocidade axial menor resulta em menor valor de rugosidade R_a ;
- interação entre erro de cilindridade pequeno e velocidade axial menor resulta em menores valores de rugosidade R_a .

- *Rugosidade R_z*

- maiores velocidades periféricas resultam em menores valores de rugosidade R_z ;
- velocidade axial menor resulta em menor valor de rugosidade R_z .

Alguns dos resultados desejáveis de serem obtidos em furos de peças brunidas, como erro de cilindridade baixo e rugosidade baixa, dependem de fatores que provocam efeitos antagônicos. Para a obtenção de pequenos erros de cilindridade a utilização de baixas velocidades periféricas é necessária, enquanto que menores rugosidades são obtidas com velocidades periféricas mais elevadas.

Para a peça utilizada como corpo de prova neste estudo, cujas tolerâncias de forma, dimensional e de rugosidade podem ser vistas na figura 8.2, a característica mais importante para o correto funcionamento do produto é o erro de cilindridade. Assim, procurou-se adequar os parâmetros de entrada de modo a serem atingidos erros de cilindridade da ordem de $1 \mu\text{m}$ ao final do processo de brunimento, ou seja, após a passagem das três ferramentas pelo furo da peça.

Dessa forma, a melhor combinação de parâmetros de entrada é descrita a seguir. Essa combinação será utilizada para a otimização do processo de brunimento:

- *sistema*

- peça com sobremetal $> 30 \mu\text{m}$;
- peça com cilindridade $< 8 \mu\text{m}$.

- *variáveis*

- velocidade periférica de 16 m/min ;
- velocidade axial de $1,0 \text{ m/min}$;
- curso com 105 mm .

9.2 Otimização do processo de brunimento para as ferramentas de semi-acabamento e de acabamento

O diâmetro final do furo, $\varnothing 12 H6$, figura 8.12, permite uma tolerância de $+ 11 \mu\text{m}$ da medida nominal, o que é considerado grande para o processo de brunimento de passe único. Entretanto, é muito desejável que um processo de fabricação seja capaz de produzir peças com uma pequena variação entre as medidas dos furos das peças produzidas o que, como foi verificado nos itens anteriores, pode ser atingido pelo processo de brunimento de passe único com ferramentas tipo bucha diamantada. O efeito de produzir furos menores em peças que possuem maior sobremetal pode ser contornado pela regulagem do diâmetro das três ferramentas que realizam a retirada de material.

A rugosidade da superfície do furo não é beneficiada com os parâmetros de corte escolhidos. Entretanto, como verificado no capítulo anterior, a rugosidade depende muito mais do tamanho do grão de diamante empregado, diminuindo com a diminuição do tamanho do grão. Como a última ferramenta utilizada no processo possui grão de diamante D30, que de acordo com a classificação da tabela 3.1 é considerado finíssimo, espera-se conseguir atingir a rugosidade determinada pelo projeto da peça. Caso contrário, uma alternativa para a obtenção de melhores acabamentos superficiais após o processo de brunimento é a utilização de escovas, como as descritas por BRM, 1987.

Por outro lado, o experimento fatorial determinou os fatores que influenciam o resultado do brunimento realizado pela ferramenta de desbaste, com grão D150. Como o tamanho de grão não foi utilizado como uma variável do experimento, não são conhecidos seus efeitos sobre o resultado do processo.

Em seu trabalho experimental, utilizando ferramentas de brunir de passe único, MILLER, 1996, verificou a influência do tamanho do grão abrasivo sobre o diâmetro do furo, erro de circularidade e rugosidade da superfície. Como resultado, o tamanho do grão abrasivo afetou, em interação com o sobremetal, apenas o erro de circularidade, sendo os menores erros de circularidade alcançados com a utilização de menores tamanhos de grão e maiores quantidades de sobremetal. Esta é uma condição que será satisfeita nestes ensaios.

Como justificativa para a não-influência do tamanho do grão abrasivo sobre a rugosidade da superfície, MILLER, 1996, realizou uma contagem aproximada do número de partículas abrasivas presentes na superfície da ferramenta e que devido ao grande número de partículas que passam pelo mesmo ponto da peça, a ação cumulativa destas partículas suprime o efeito do

tamanho do grão abrasivo. O único fator importante é o formato da extremidade do grão abrasivo, que depende do dressamento e do desgaste dos grãos abrasivos.

Além disso, os resultados apresentados por MILLER, 1996, contradizem o que foi verificado no experimento fatorial, onde a velocidade periférica se revelou fator influente sobre a rugosidade da superfície do furo brunido.

Neste trabalho a contagem de grãos de diamante na superfície das buchas, realizado no item 8.2.2, dá a impressão de que realmente um grande número de partículas abrasivas atua sobre a superfície do furo. Entretanto, o volume de material removido por grão parece ser alto, o que poderia ocasionar o acúmulo de material entre os grãos e a parede do furo, riscando-a e aumentando a rugosidade. Assim, não se pode afirmar que a ação de grande número de partículas abrasivas suprime o efeito do tamanho do grão quanto à redução da rugosidade. Provavelmente os tamanhos dos grãos escolhidos por MILLER, 1996, para o experimento não permitiram determinar uma redução da rugosidade da superfície do furo.

9.2.1 Otimização da velocidade periférica para as ferramentas de semi-acabamento e de acabamento

A otimização da velocidade periférica foi realizada através do brunimento de três peças para cada uma das três condições de velocidade periférica escolhidas. A avaliação do resultado foi realizada pela medição do erro de cilindricidade, diâmetro do furo produzido e rugosidades R_a e R_z , medidas com apalpador mecânico. Para isso utilizou-se o teste múltiplo de Duncan, apresentado no capítulo 8.

Todas as peças foram inicialmente brunidas com a ferramenta de desbaste, D150, na melhor condição verificada através do experimento fatorial descrito anteriormente. Em seguida a ferramenta de semi-acabamento, D50, usinou três grupos de três peças, cada grupo com velocidades periféricas diferentes: 16 m/min, 20 m/min e 26 m/min.

Para a melhor condição de velocidade periférica encontrada na usinagem com a ferramenta de semi-acabamento outros três grupos de três peças foram brunidos. A seguir a ferramenta de acabamento, D30, usinou estes grupos com as seguintes velocidades periféricas: 20 m/min, 26 m/min e 31 m/min.

O cálculo do teste múltiplo de Duncan pode ser visto no anexo 6.

a) Otimização da velocidade periférica para a ferramenta de semi-acabamento D50

Os resultados do teste múltiplo de Duncan para a determinação dos efeitos da velocidade

periférica da ferramenta de semi-acabamento sobre a cilindridade, diâmetro e rugosidade da superfície do furo brunido, visando a otimização do processo de brunimento, é apresentado e discutido a seguir.

- Erro de cilindridade

Da mesma forma que verificado para a ferramenta de desbaste, para a ferramenta de semi-acabamento o aumento da velocidade periférica leva a maiores erros de cilindridade, tendo como causa o efeito de “chicoteamento” da ferramenta causado pelo desbalanceamento do conjunto ferramenta-fixação.

O teste de Duncan demonstra que a média dos resultados do erro de cilindridade obtidos com a velocidade periférica de 26 m/min difere significativamente, com 95 % de confiabilidade, das médias dos erros de cilindridade obtidas com velocidades de 20 e 16 m/min.

A média do erro de cilindridade obtido com velocidade periférica de 20 m/min não difere significativamente da média do erro de cilindridade obtida com velocidade de 16 m/min, permitindo considerar que estas velocidades resultam em erros de cilindridade semelhantes.

- Diâmetro do furo

Todas as médias das medidas dos diâmetros dos furos obtidas com as diferentes velocidades periféricas, de acordo com o teste de Duncan, diferem significativamente.

Embora para a ferramenta de desbaste a velocidade periférica não tenha revelado efeito significativo sobre o diâmetro do furo, para a ferramenta D50 esta variável apresenta influências.

A média das medidas dos diâmetros dos furos diminui com o aumento da velocidade periférica. Para uma mesma velocidade axial era esperado que o aumento da rotação da ferramenta ocasionasse maiores medidas do diâmetro do furo, visto que um maior número de grãos abrasivos passaria pelo mesmo ponto do peça, removendo, assim, uma maior quantidade de material.

Assim, o comportamento apresentado pela ferramenta de semi-acabamento não possui explicação óbvia. Talvez o pequeno número de amostras não permita a correta avaliação do efeito da velocidade periférica sobre o diâmetro do furo. Dos dados apresentados no anexo 5, verifica-se que a diferença entre os valores máximo e mínimo dos diâmetros dos colos da peça é da ordem de apenas 3 μm , enquanto que a incerteza de medição da máquina de medir por

coordenadas é de 1,4 μm , anexo 3. Seria necessária uma verificação mais apurada para a comprovação do comportamento da ferramenta de semi-acabamento.

- Rugosidade R_a

Confirmando os resultados obtidos no experimento fatorial, maiores velocidades periféricas proporcionam um melhor acabamento da superfície, ou seja, menores valores de rugosidade R_a .

A média dos valores de rugosidade R_a obtida com a velocidade periférica de 26 m/min difere significativamente da rugosidade proporcionada pelas velocidades de 20 e 16 m/min. As duas velocidades menores não possuem médias de valores significativamente diferentes a 5 %.

Pode-se considerar que a rugosidade da superfície do furo brunido é afetada de maneira positiva apenas a partir de determinado valor de velocidade periférica, maior que 23 m/min.

- Rugosidade R_z

O comportamento da rugosidade R_z com a variação de velocidade periférica é idêntico ao revelado pela rugosidade R_a . A média do valor de rugosidade para a velocidade de 26 m/min difere significativamente das demais médias e apresenta menores valores.

O aumento da velocidade periférica aumenta o número de grãos de diamante atuantes num mesmo comprimento usinado, proporcionando que cada grão retire um menor volume de cavaco, e produza ranhuras com profundidades menores na superfície do furo.

b) Critérios de seleção da velocidade periférica para a ferramenta de semi-acabamento

Pequeno erro de cilindridade, como já mencionado anteriormente, é a principal característica a ser observada no furo brunido das peças. Os menores erros de cilindridade foram obtidos com velocidades periféricas de 16 e 20 m/min, as quais produzem erros de cilindridade sem diferença significativa.

Quanto ao diâmetro do furo, apesar da influência da rotação da ferramenta não ser muito clara, é desejável que menores quantidades de sobremetal, ou seja, maiores diâmetros, sejam fornecidas para a ferramenta de acabamento. Com uma menor quantidade de sobremetal pretende-se minimizar o desgaste dos grãos de diamante e produzir menores de cavacos, os quais podem deixar a região de corte com maior facilidade.

Diâmetros maiores são obtidos com menores velocidades de corte, 16 e 20 m/min.

As menores rugosidades de superfície são conseguidas com a maior velocidade

periférica, 26 m/min. Porém, esta velocidade prejudica as outras duas características desejáveis. A utilização da velocidade periférica de 16 m/min ou 20 m/min é, segundo os resultados do teste de Duncan, indiferente, devendo produzir resultados similares.

Diante do exposto, a velocidade periférica selecionada é 16 m/min para a condição de usinagem 1 e 20 m/min para a condição de usinagem 2.

c) Otimização da velocidade periférica para a ferramenta de acabamento D30

- Erro de cilindricidade

Novamente o aumento da velocidade periférica leva a maiores erros de cilindricidade, efeito já observado na ferramenta de desbaste e de semi-acabamento.

Através do teste de Duncan para esta ferramenta verifica-se o mesmo comportamento da ferramenta recoberta com grãos de tamanho D50 quanto às médias dos erros de cilindricidade. A média dos erros produzida pela velocidade periférica de 31 m/min difere significativamente das outras médias enquanto que as médias dos erros de cilindricidade obtidas com velocidades de 26 e 20 m/min não são significativamente diferentes.

- Diâmetro do furo

As médias das medidas dos diâmetros dos furos obtidas com velocidades de 31 m/min diferem significativamente das obtidas com velocidades de 26 m/min e 20 m/min. As velocidades menores, entretanto, não produzem médias com diferença significativa.

Velocidades maiores produzem furos com diâmetro maior. Embora os diâmetros médios produzidos por todas as variações de velocidade periférica estejam dentro da tolerância especificada para a peça, nota-se dos valores dos diâmetros dos colos, anexo 6, a tendência de formação de furos com forma de ampulheta.

Essa tendência também foi verificada na usinagem com a ferramenta de desbaste. Naquela ocasião justificou-se a produção deste formato pelo curso de trabalho da ferramenta em nível alto, causando uma pequena área de material de suporte para a ferramenta que, devido à força centrífuga atuante sobre o conjunto ferramenta-fixação, é insuficiente para estabilizar a ferramenta, alargando os diâmetros dos colos das extremidades.

Neste caso o curso da ferramenta corresponde ao nível baixo utilizado no experimento fatorial, mas a velocidade periférica utilizada nesta parte do trabalho, 31 m/min, é 19 % maior que o nível alto da velocidade utilizada para a ferramenta de desbaste. A rotação correspondente

a esta velocidade pode elevar a instabilidade do sistema de tal forma que os colos das extremidades sofram uma maior retirada de material devido ao chicoteamento da ferramenta.

- Rugosidade R_a

As médias dos valores de rugosidade R_a obtida com todas as velocidades periféricas não diferem significativamente entre si.

- Rugosidade R_z

O comportamento da rugosidade R_z com a variação de velocidade periférica para a ferramenta de acabamento é idêntico ao verificado para a ferramenta de semi-acabamento.

A média do valor de rugosidade para a velocidade de 31 m/min difere significativamente das outras duas médias e apresenta menores valores.

O fato da rugosidade R_a não apresentar diferenças significativas entre os tratamentos, velocidades periféricas, enquanto que a rugosidade R_z apresenta médias diferentes, parece estar relacionado com a definição do cálculo desses parâmetros, anexo 1. A rugosidade R_a é menos sensível aos vales produzidos na superfície da peça pelo brunimento do que a rugosidade R_z .

d) Critérios de seleção da velocidade periférica para a ferramenta de acabamento

As menores velocidades periféricas verificadas, 20 m/min e 26 m/min, são mais adequadas para que baixos erros de cilindridade e que furos com medidas de diâmetro dos colos mais repetitivos sejam atingidos.

As ferramentas de semi-acabamento e de acabamento podem ser utilizadas com maiores velocidades de corte, dentro de determinados limites, em relação à ferramenta de desbaste, sem prejuízo ao erro de forma devido à menor agressividade com que os grãos abrasivos menores penetram na superfície do furo, MILLER, 1996. A partir de certo valor da velocidade periférica passam a predominar os efeitos da instabilidade do sistema ferramenta-fixação.

A rugosidade da superfície é afetada pelo aumento da velocidade periférica, entretanto, somente em níveis próximos a 31 m/min.

Para a ferramenta de acabamento, a condição de usinagem 1 será realizada com velocidade periférica de 20 m/min e a condição 2 com velocidade periférica de 26 m/min.

CAPÍTULO 10

COMPROVAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO

A comprovação estatística dos resultados será efetuada através do brunimento de 20 peças, divididas em dois grupos iguais que serão usinados com duas condições de parâmetros de entrada diferentes, conforme definido na determinação do tamanho da amostra, capítulo 8.

Os resultados serão verificados através da medição do erro de cilindridade, do diâmetro do furo produzido, da rugosidade R_a , da rugosidade R_z e da rugosidade R_{max} .

A tabela 10.1 apresenta as condições de usinagem selecionadas para a comprovação estatística dos resultados, definidas no capítulo 9. O anexo 7 contém as medições realizadas nas 20 peças selecionadas para cada etapa da operação de brunimento.

A incerteza do resultado, calculada para todas as etapas do processo de brunimento, pode ser obtida através da expressão:

$$\text{Incerteza do resultado} = \pm 2 \sqrt{(IM/2)^2 + (\sigma / \sqrt{n})^2} \quad 10.1$$

onde:

IM - incerteza das medições individuais (anexo 2);

n - número de medidas realizadas em cada condição de parâmetros de entrada;

σ - desvio padrão das “n” medidas.

Tabela 10.1 – Parâmetros de entrada selecionados para a comprovação estatística do brunimento com ferramentas tipo bucha diamantada

Condição	Peças	Sobre metal (μm)	Cilindri- cidade (μm)	Velocidade axial (m/min)	Curso (mm)	Velocidade periférica (m/min)		
						Desbaste D150	Semi- acabam. D50	Acabam. D30
1	1 a 10	> 30	< 8	1,0	105	16	16	20
2	11 a 21	> 30	< 8	1,0	105	16	20	26

10.1 Erro de cilindridade

A figura 10.1 ilustra os resultados obtidos com o processo de brunimento com ferramentas de passe único tipo bucha diamantada quanto aos erros de cilindridade do furo para a condição 1 de dados de entrada otimizados, definidos na tabela 10.1.

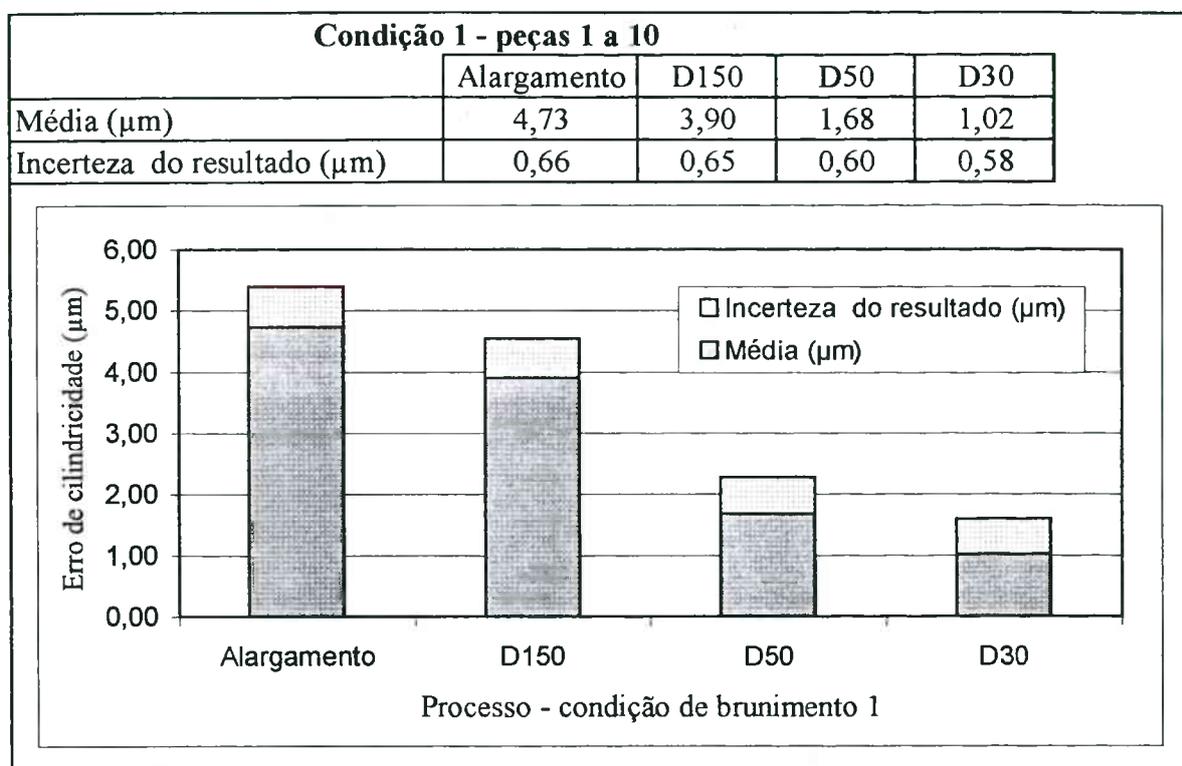


Figura 10.1 – Erros de cilindridade obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – condição 1

A figura apresenta os erros de cilindridade iniciais, provenientes do processo de alargamento, e a gradual correção deste erro com a utilização das ferramentas de brunir de desbaste (D150), de semi-acabamento (D50) e de acabamento (D30).

Na figura 10.2 são apresentados os resultados para a condição 2 de dados de entrada do processo de brunimento.

Uma comparação entre os erros de cilindridade do furo produzidos pela condição 1 e pela condição 2, revela que os erros da condição de usinagem 2 são superiores aos da condição 1 nas ferramentas de desbaste e de semi-acabamento e iguais na ferramenta de acabamento. Entretanto, a incerteza do resultado da condição 2 é sempre maior que o da condição 1, devido ao desvio-padrão, que é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação à média, dos

resultados obtidos sob esta condição ser maior que a condição 1..

Dois fatos importantes podem ser comprovados desta comparação. Um é que velocidades periféricas e axiais maiores, condição 2, tabela 10.1, resultam em maiores erros de cilindridade. Outro fato é que a agressividade do grão do diamante diminui com a redução do tamanho do grão, permitindo obter, nas ferramentas de acabamento, erros de cilindridade semelhantes mesmo para maiores velocidades periféricas.

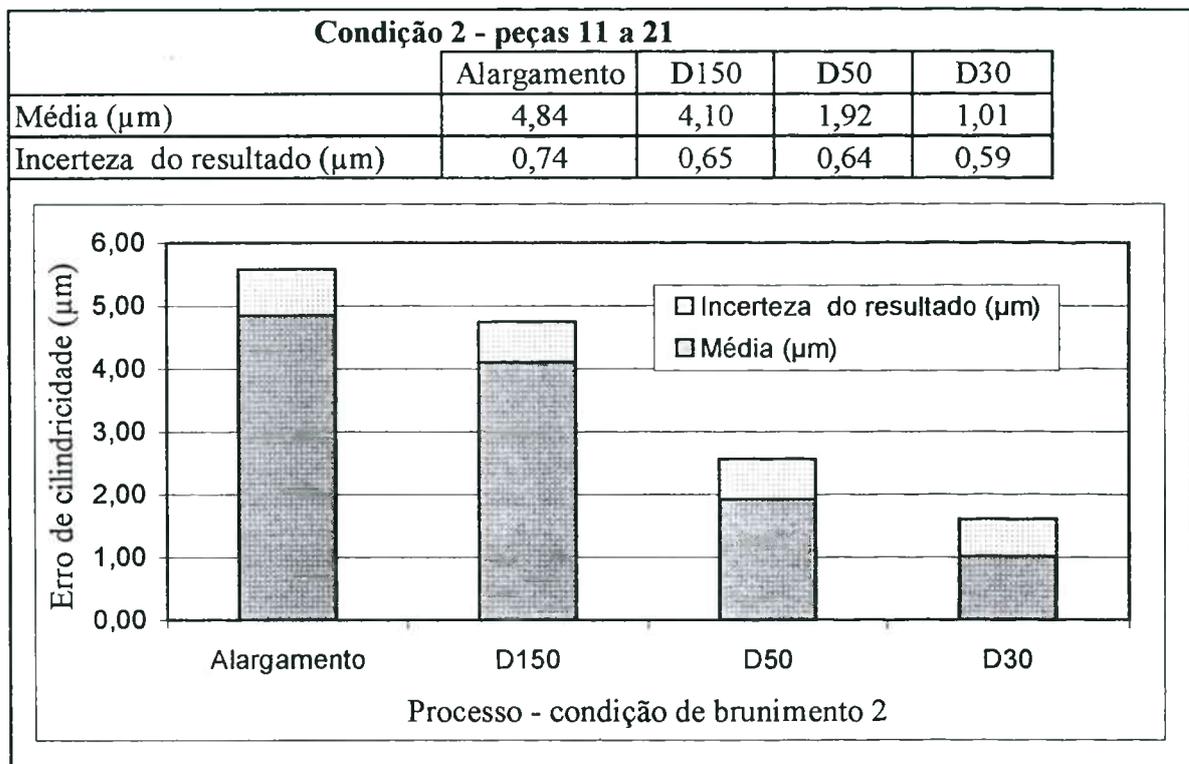


Figura 10.2 – Erros de cilindridade obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – condição 2

A comparação entre as condições de entrada do processo de brunimento pode ser vista na figura 10.3. Com os resultados obtidos pode-se afirmar que o processo de brunimento de passe único, utilizando-se ferramentas tipo bucha diamantada, após a otimização do processo, é capaz de produzir furos com precisão de forma da ordem de 1 μm .

Estes resultados possuem uma confiabilidade de 95 %, conforme definido na escolha do tamanho da amostra, realizada no capítulo 8.

A figura 10.4 ilustra os perfis de cilindridade obtidos nas medições de uma mesma peça após cada etapa do processo de brunimento. Nesta figura está exemplificada a redução do erro de

cilindricidade proveniente do processo de alargamento, 10.4a, inicialmente de 5,80 μm , até atingir 0,95 μm , 10.4d, após a passagem da ferramenta de acabamento pelo furo.

Os erros de circularidade de cada colo do furo da peça, utilizados no cálculo do erro de cilindridade realizado pela máquina de medir erros de forma, situam-se na ordem de 40 a 60 % dos valores do erros de cilindridade obtidos.

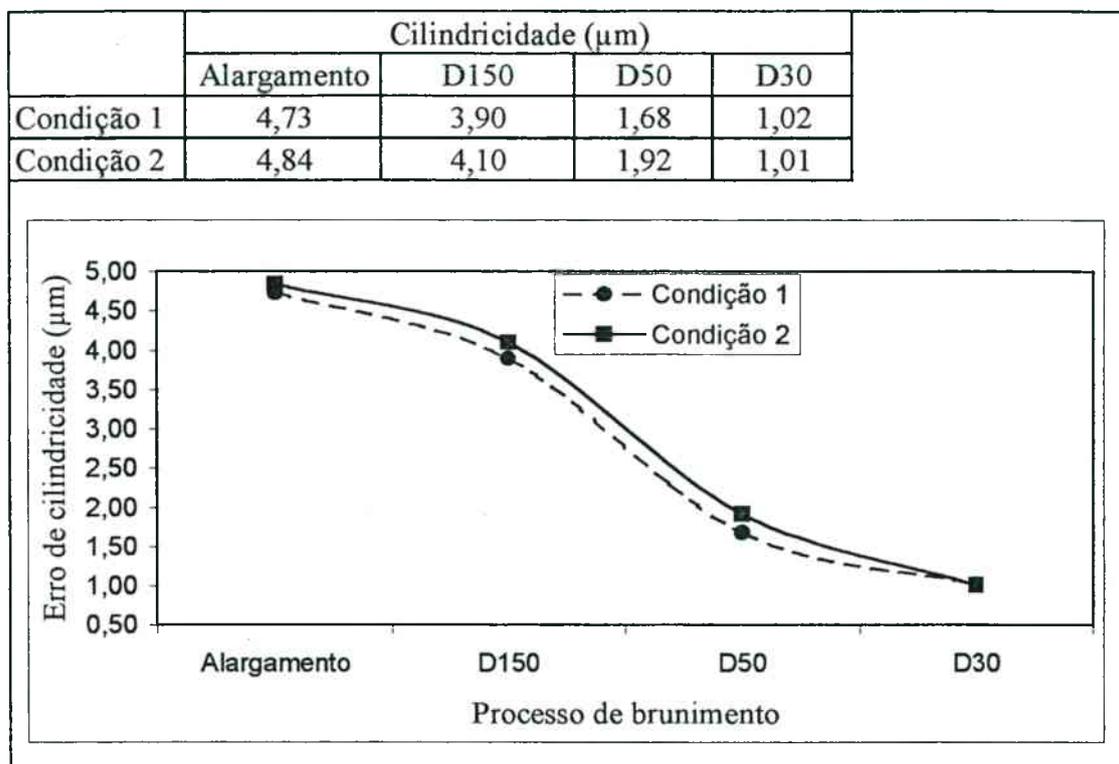


Figura 10.3 – Comparação dos erros de cilindridade obtidos pelo processo de brunimento com as condições de usinagem otimizadas

10.2 Diâmetro do furo

Os resultados do processo de brunimento, investigado neste trabalho, quanto ao diâmetro do furo produzido, podem ser vistos na figura 10.5. Os valores apresentados nesta figura, para as duas condições de brunimento, são as médias dos diâmetros dos furos das peças utilizadas como corpos de provas, sendo o diâmetro destes furos, por sua vez, a média dos valores dos quatro colos, anexo 7.

As duas condições de brunimento resultaram em diâmetros de furos praticamente iguais, o que contraria o resultado do teste múltiplo de Duncan para a ferramenta de semi-acabamento. Como foi discutido naquele item, o comportamento de redução do diâmetro com o aumento da

velocidade periférica não possuía justificativa identificada.

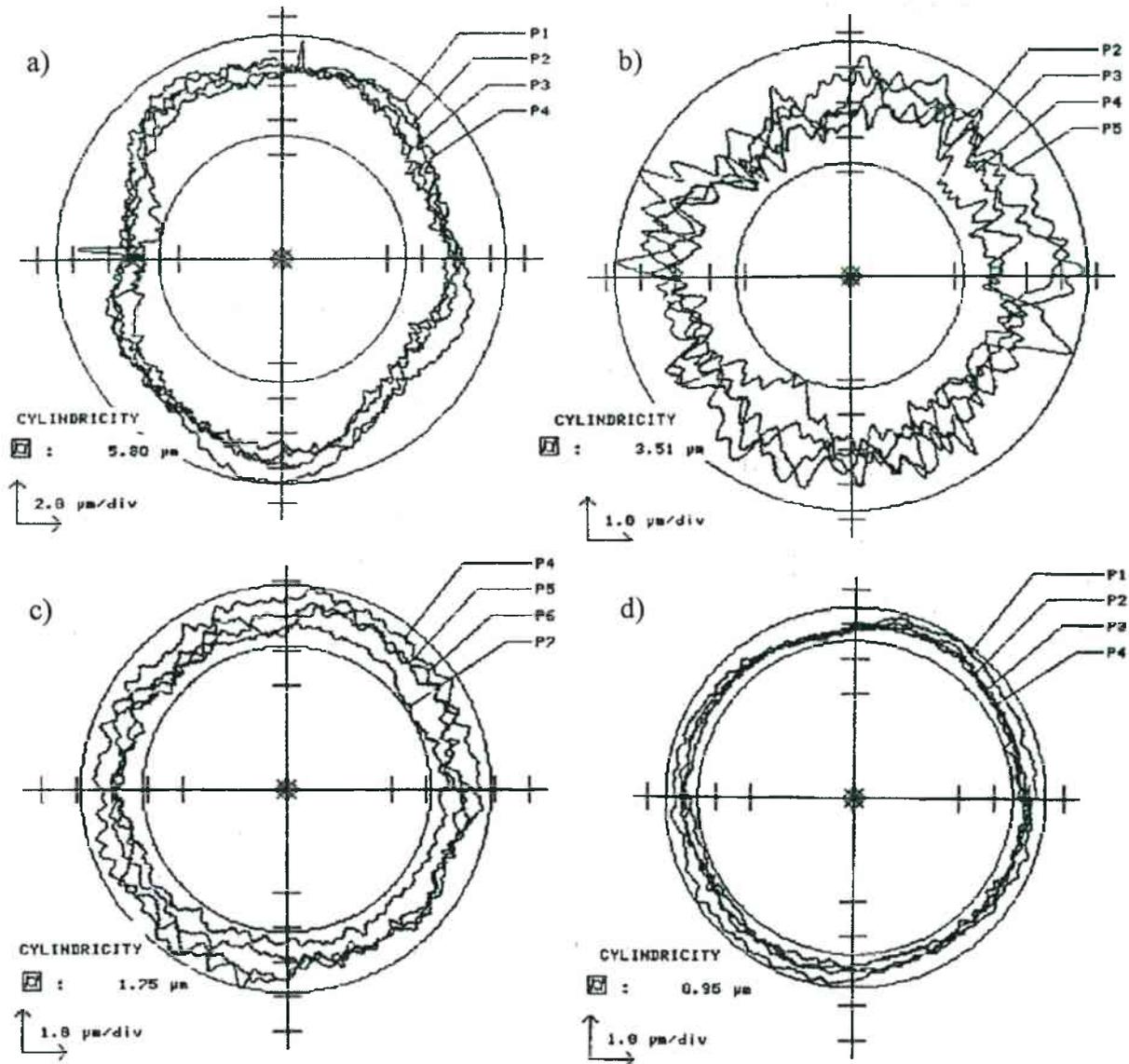


Figura 10.4 – Erros de cilindridade do furo conforme as etapas do processo: a) alargamento, b) brunimento de desbaste, c) brunimento de semi-acabamento e d) brunimento de acabamento

Após o brunimento de acabamento a média dos diâmetros dos furos é idêntica para todas as peças, com uma confiabilidade de 95 %. Nota-se que a incerteza do resultado possui o mesmo valor que a incerteza das medições individuais significando que o desvio-padrão das medidas é insignificante. O comportamento do desvio-padrão das medidas dos diâmetros dos furos brunidos revela uma tendência deste processo de fabricação produzir peças com furos de elevada precisão dimensional com ótima repetitividade, algo muito desejável em uma produção seriada. A

comprovação deste fato, entretanto, depende da utilização de instrumentos de medição com uma menor incerteza de medição.

A figura 10.6 ilustra a comparação entre os resultados, relativos ao diâmetro dos furos, das duas condições de brunimento.

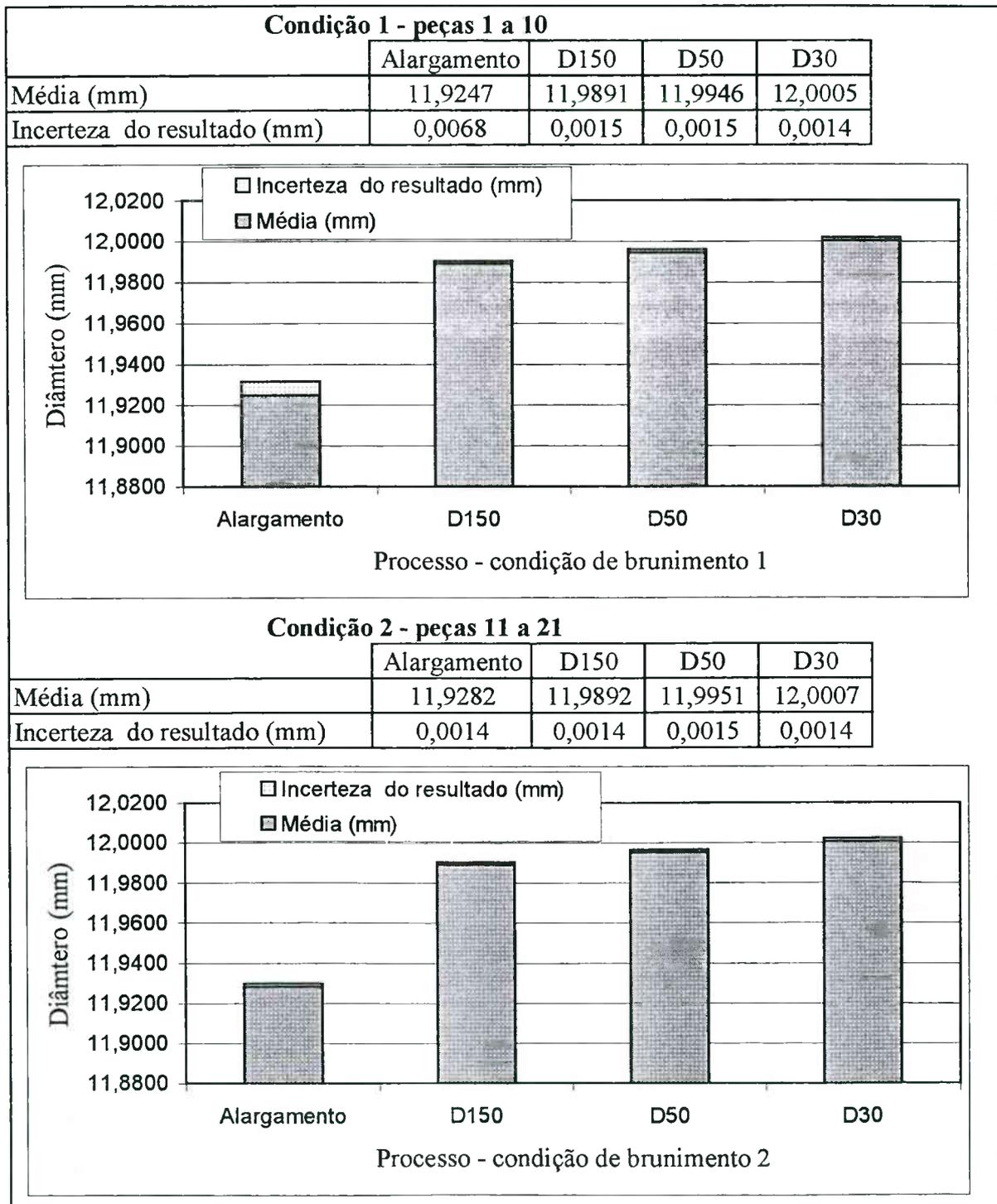


Figura 10.5 – Diâmetros obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados

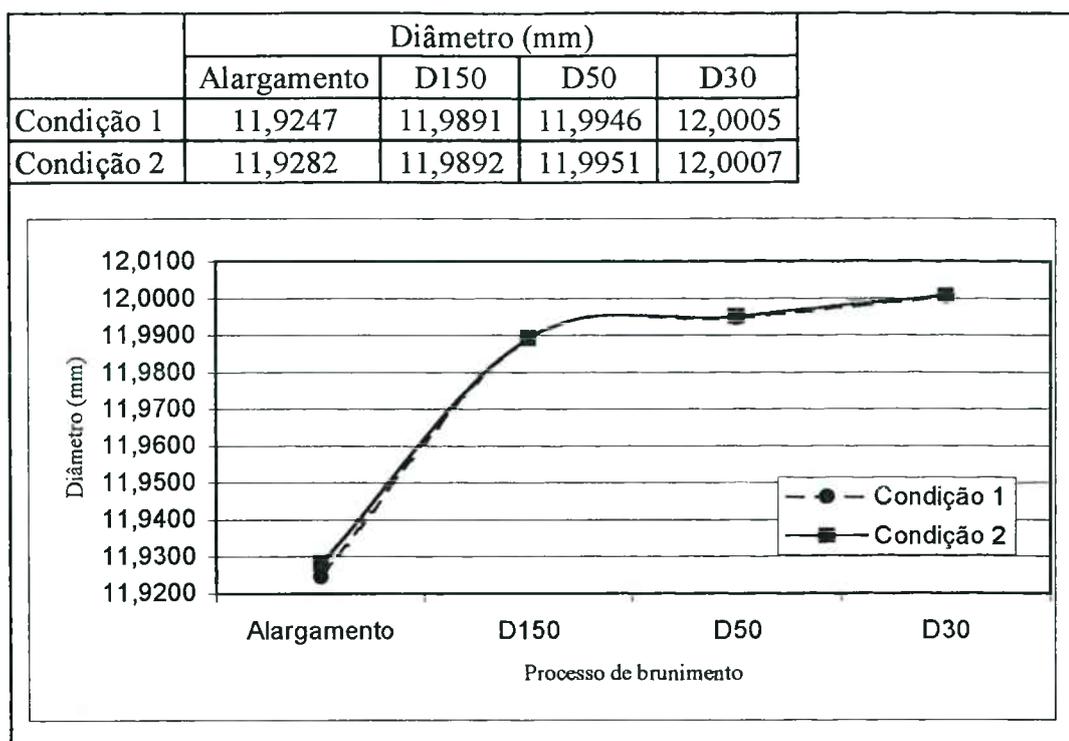


Figura 10.6 – Comparação dos diâmetros médios dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições de brunimento otimizadas.

10.3 Rugosidade R_a

Os resultados do processo de brunimento quanto à rugosidade R_a da superfície do furo podem ser vistos na figura 10.7, para as medições realizadas com apalpador mecânico e na figura 10.8, para as medições realizadas com o apalpador ótico.

A confiabilidade dos valores apresentados é de 95%, segundo definido na escolha do tamanho da amostra realizada no capítulo 8.

Destes resultados pode-se concluir que os valores de velocidade periférica selecionados para as duas condições de parâmetros de entrada do processo de brunimento, em função da otimização do erro de cilindricidade, não afetaram os valores resultantes da rugosidade R_a nos dois sistemas de apalpação, mecânico e ótico. O comportamento de redução da rugosidade deve-se exclusivamente ao tamanho do grão de diamante empregado em cada etapa do processo.

Esse fato comprova os resultados do teste múltiplo de Duncan. O teste acusou que as médias da rugosidade R_a , obtidas com as três velocidades periféricas, não possuíam diferença significativa.

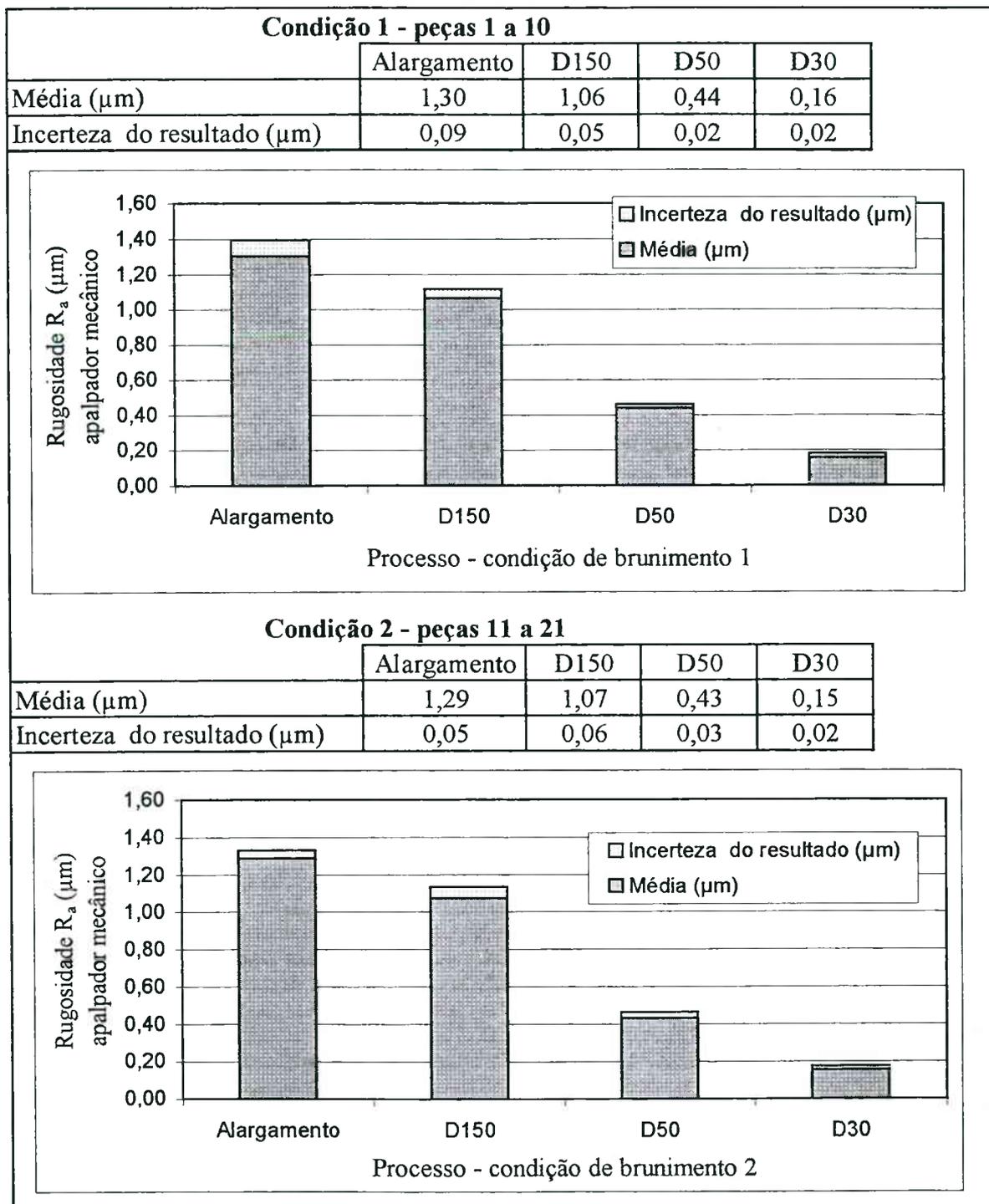


Figura 10.7 – Valores de rugosidade R_a obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação mecânico

A figura 10.9 ilustra o comportamento da média das medições de rugosidade R_a da superfície dos furos de acordo com as condições de entrada otimizadas. Uma observação quanto aos resultados apresentados pode ser feita em relação à ordem de grandeza das diferenças entre

os valores de rugosidade R_a medidos com o sistema de apalpação mecânico e ótico para uma mesma etapa do processo.

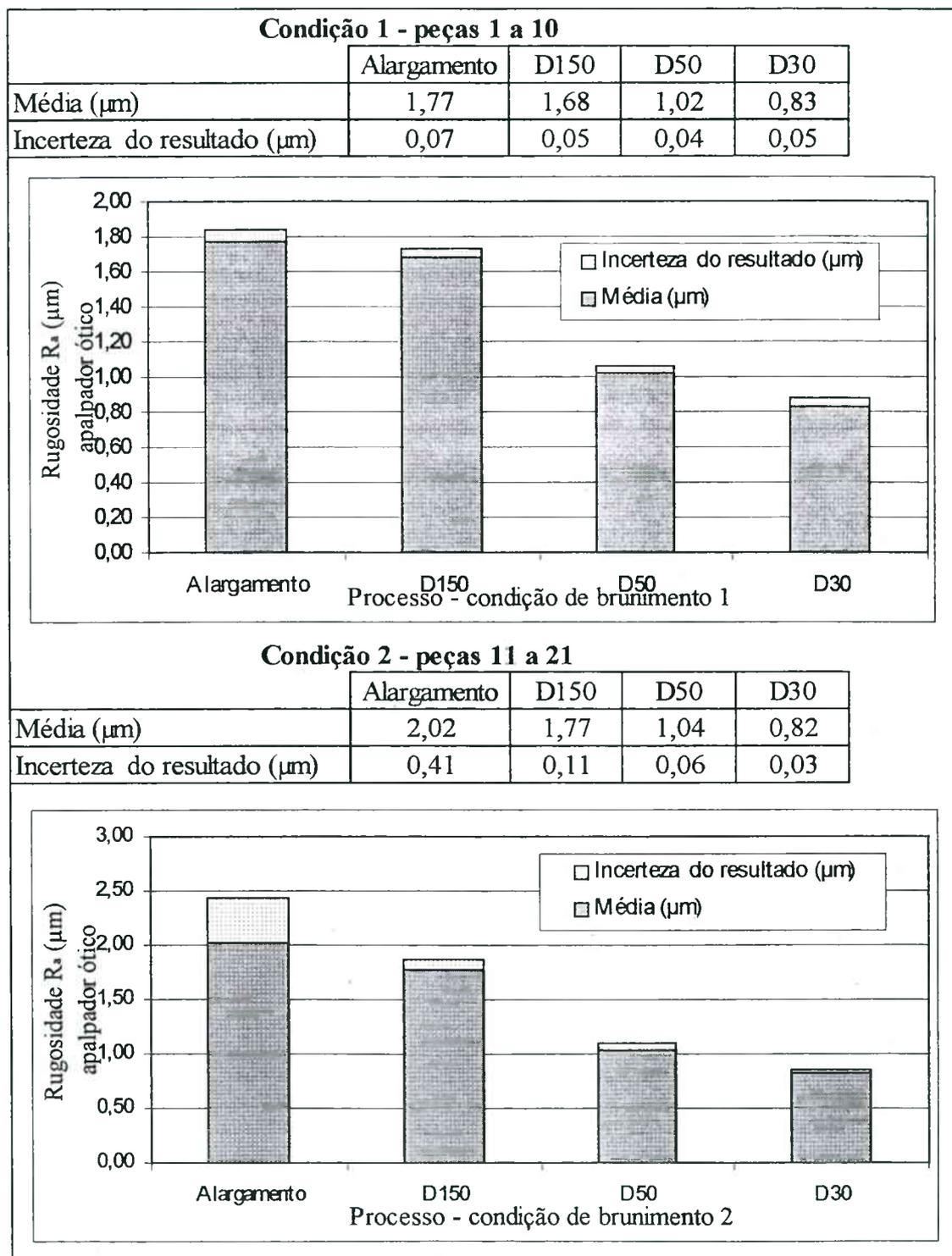


Figura 10.8 – Valores de rugosidade média R_a obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação ótico

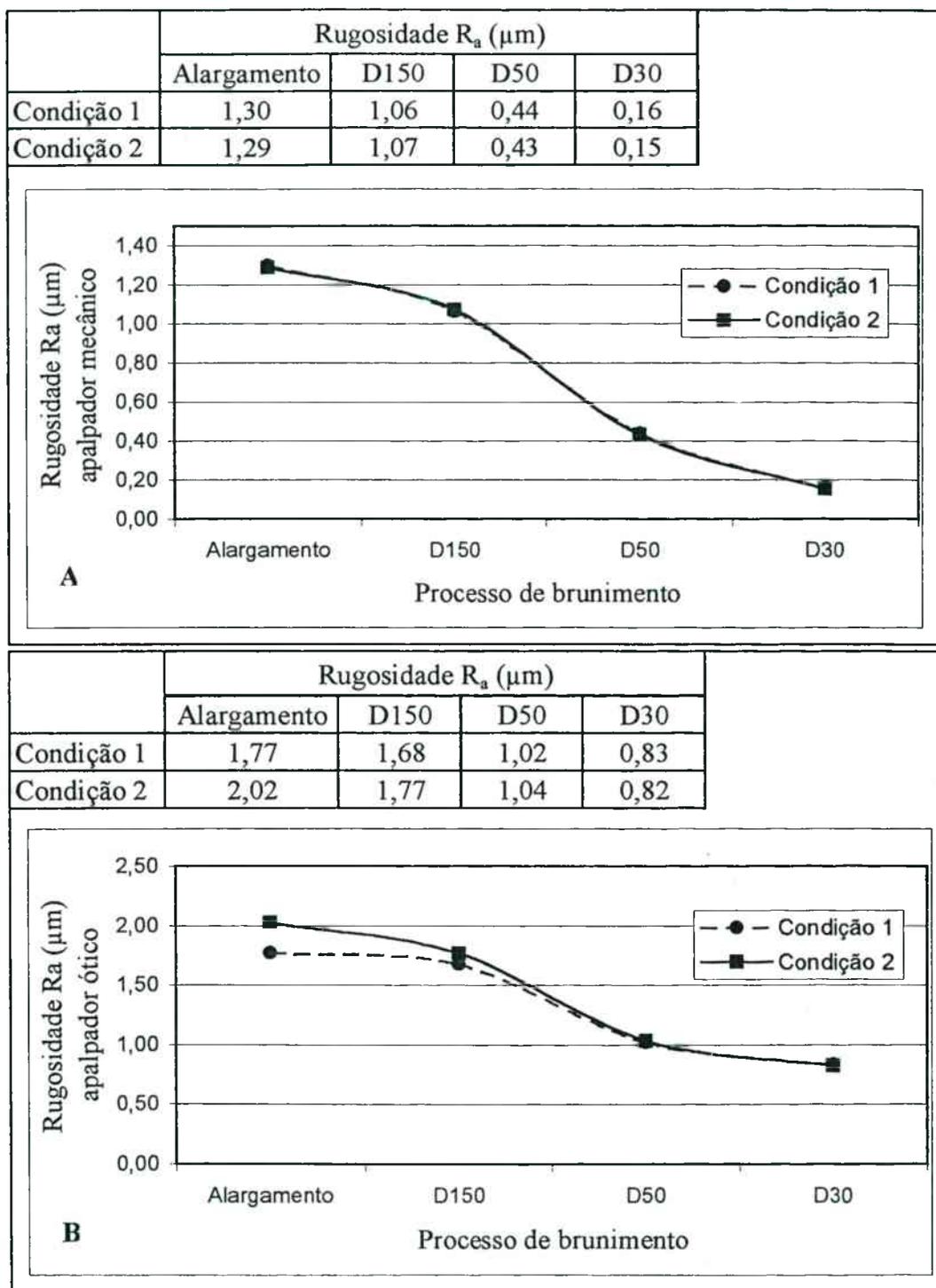


Figura 10.9 – Comparação dos valores de rugosidade R_a da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições de brunimento otimizadas –

A) apalpador mecânico, B) apalpador ótico

Na etapa de alargamento e brunimento de desbaste, onde são formados perfis com vales

profundos e picos altos, a diferença entre os valores médios de rugosidade R_a medidos com o sistema de apalpação mecânico e ótico situa-se na ordem de 1,5x. Nas etapas de brunimento de semi-acabamento e de acabamento a diferença entre os valores de rugosidade passa a ser de 2,5x e 5x, respectivamente. Essa diferença deve-se ao pequeno diâmetro do feixe LASER do apalpador ótico, quando comparado ao raio do diamante do apalpador mecânico, que “penetra” em imperfeições não alcançadas pelo apalpador mecânico, como demonstra a figura 7.4.

A incerteza do resultado das medições realizadas com o apalpador ótico também demonstrou-se sempre maior que a incerteza dos resultados das medições com o apalpador mecânico, como era de se esperar. Isto deve-se à maior dispersão das medidas do apalpador ótico em relação à média, desvio-padrão, causada pela maior sensibilidades deste, em relação ao apalpador mecânico.

Nas etapas de acabamento os picos anteriormente formados são removidos, figura 7.6, enquanto que os vales mais profundos permanecem. Como a sensibilidade do apalpador ótico, devido ao seu pequeno diâmetro focal, figura 7.4, é maior do que o apresentado pelo apalpador mecânico para acessar o fundo dos vales, pode-se creditar a esta característica as diferenças apresentadas.

10.4 Rugosidade R_z

A confiabilidade dos dados referentes ao resultado do processo de brunimento com ferramentas tipo bucha diamantada, medido quanto à rugosidade R_z , é de 85%. Para que uma confiabilidade de 95% fosse alcançada seriam necessárias medições em pelo menos 20 amostras.

Os valores de rugosidade R_z , assim como todos os valores de rugosidade, apresentados para cada etapa do processo são resultado da média da rugosidade dos furos das 10 peças utilizadas em cada condição de usinagem. A rugosidade do furo da peça, por sua vez, é a média da rugosidade medida nos quatro colos que compõem o furo.

A figura 10.10 mostra os resultados obtidos com o sistema de apalpação mecânico para os dados de entrada do processo de brunimento otimizados. Mais uma vez, conclui-se que os valores de velocidade periférica utilizados não influem de maneira benéfica na redução da rugosidade R_z da superfície, cabendo esta tarefa ao tamanho do grão de diamante utilizado em cada etapa do processo de brunimento.

Os dados referentes às medições realizadas com o apalpador ótico estão na figura 10.11. A redução da rugosidade R_z deve-se, aqui também, ao tamanho do grão abrasivo utilizado,

entretanto somente para as etapas de semi-acabamento e de acabamento.

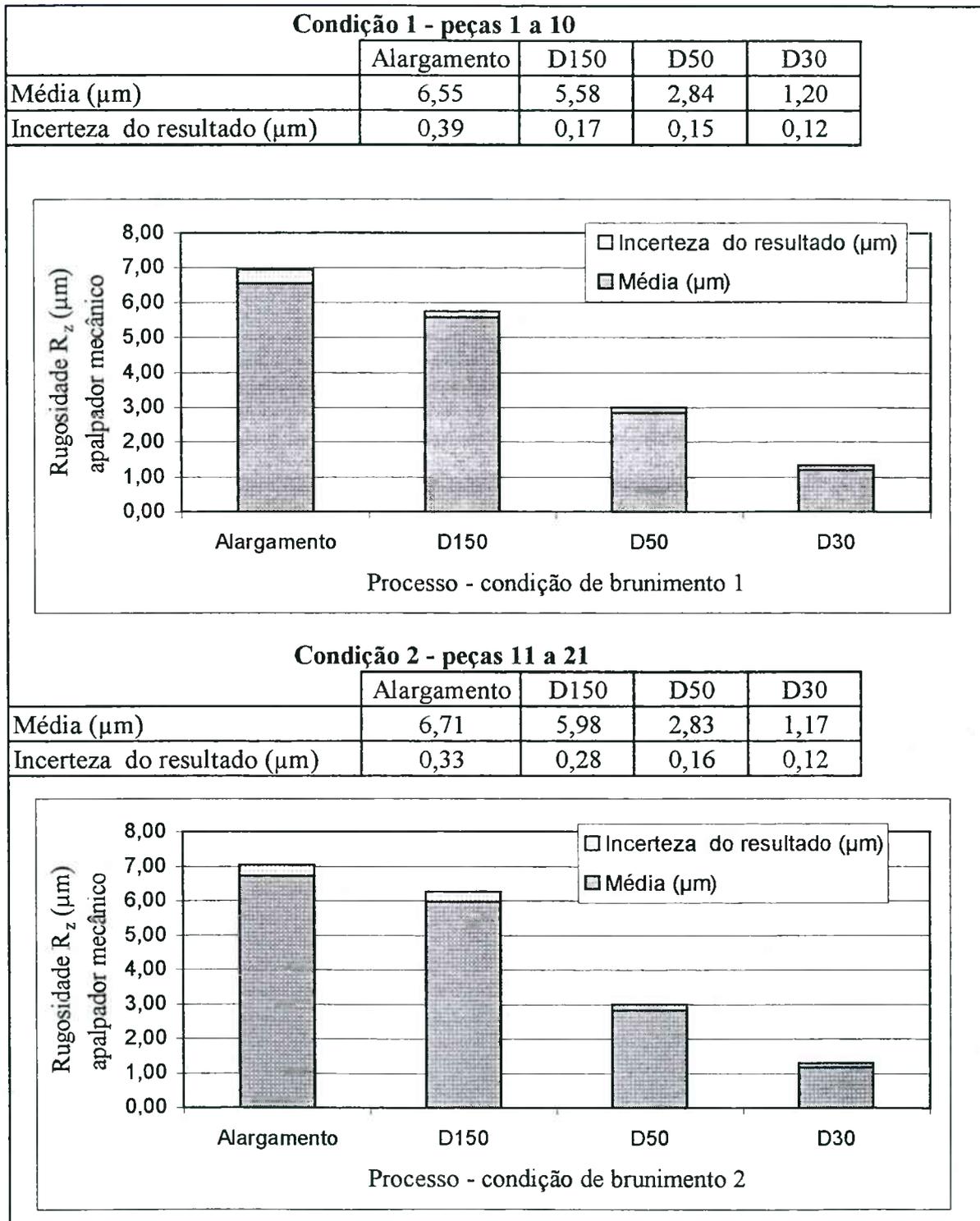


Figura 10.10 – Valores de rugosidade R_z obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação mecânico

Nas medições com sistema de apalpação ótica verifica-se que a primeira etapa de

brunimento, desbaste com grãos de diamante tamanho D150, resulta em valores médios de rugosidade R_z maiores dos que os valores apresentados pela superfície do furo alargado, conforme ilustra a figura 10.13.

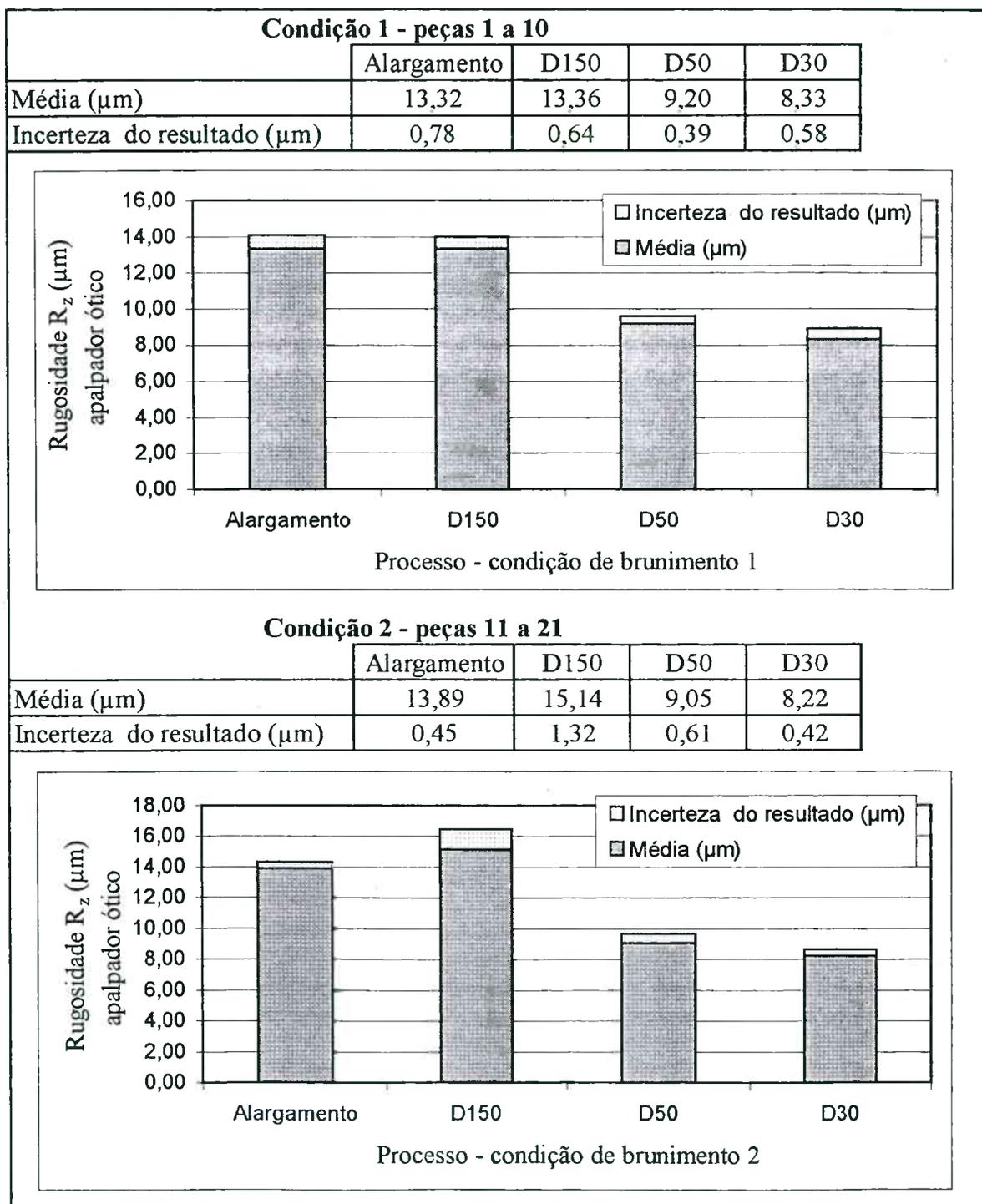


Figura 10.11 – Valores de rugosidade R_z obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação ótico

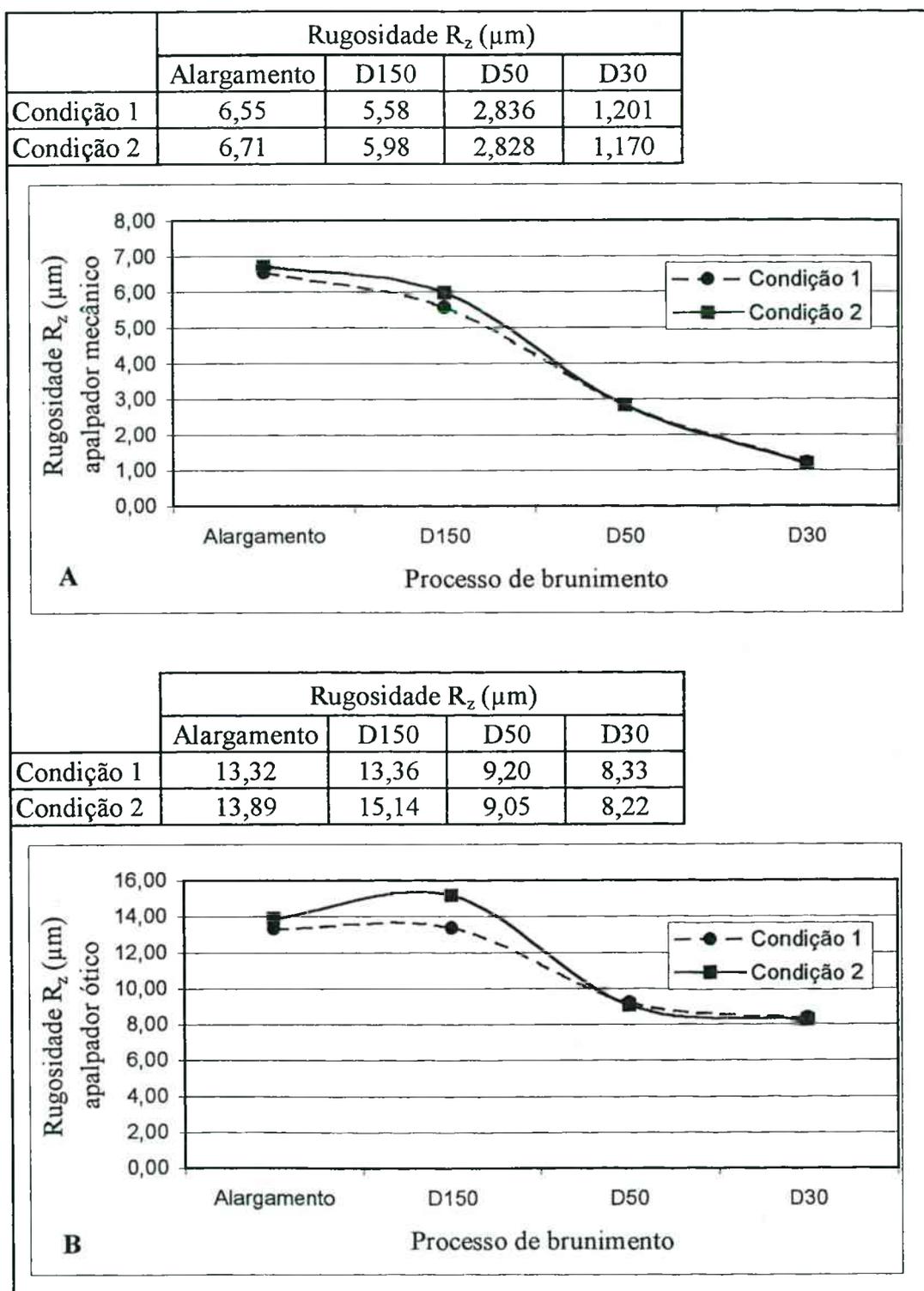


Figura 10.12 – Comparação dos valores de rugosidade R_z da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições de brunimento otimizadas – A) apalpador mecânico, B) apalpador ótico

Essa característica pode ser justificada pela formação de profundas ranhuras na superfície do furo, como ilustra a figura 10.13, durante a remoção do sobremetal na etapa de brunimento de desbaste. Como explanado no item de resultados da rugosidade R_a , o fato desta característica ser detectada pelo apalpador ótico e passar despercebida pelo apalpador mecânico é devido à maior sensibilidade deste sistema de apalpação para medição de superfícies com sulcos profundos.

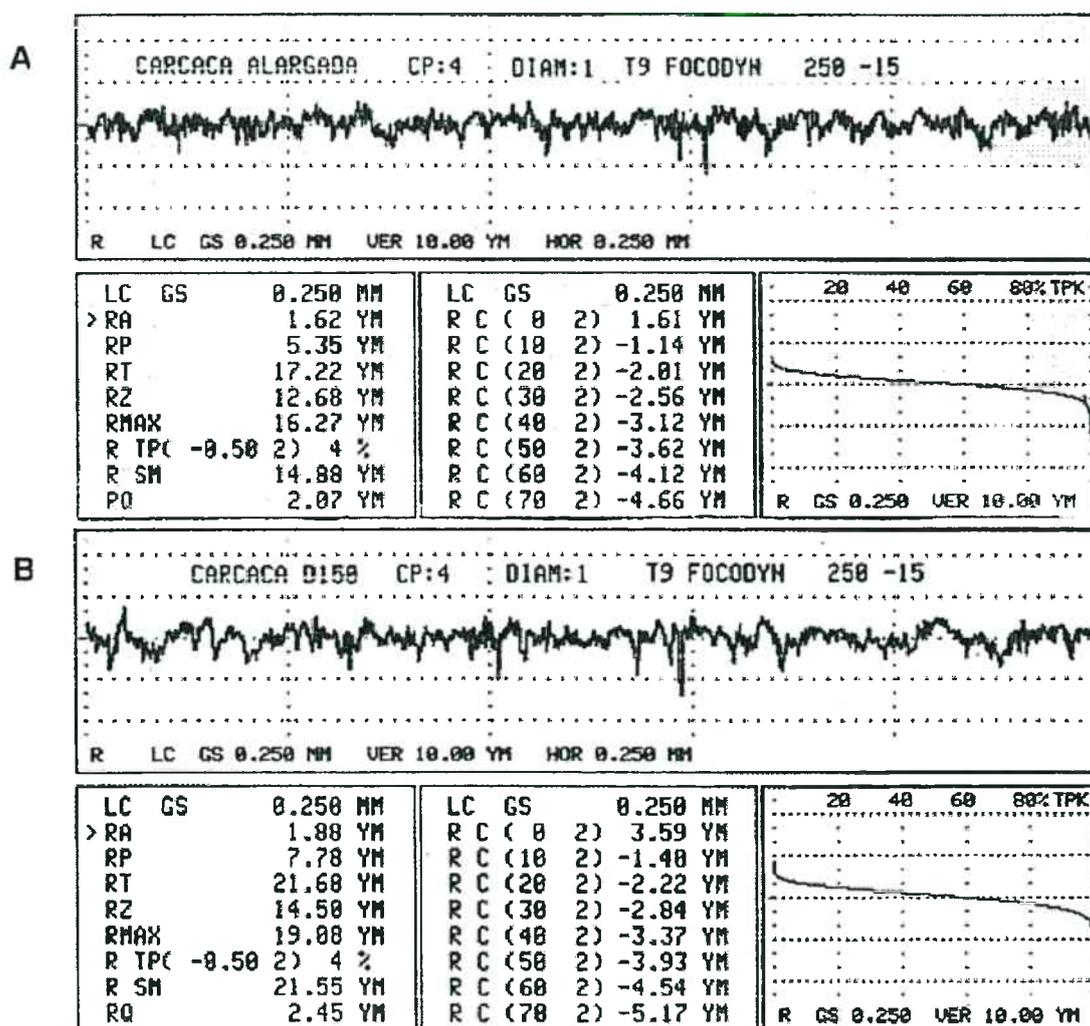


Figura 10.13 – Medições de rugosidade R_z da superfície dos furos realizadas nas etapas de alargamento (A) e brunimento de desbaste (B) com apalpador ótico

Outra característica da superfície brunida revelada pela medição com sistema de apalpação ótica é a quase inexistente redução da rugosidade R_z entre as etapas de brunimento de semi-acabamento e de acabamento. Isto significa que os sulcos mais profundos, produzidos durante o brunimento de desbaste e reduzidos pelo brunimento de semi-acabamento, não são removidos

pelo brunimento de acabamento. Esta característica também foi detectada nas medições de rugosidade R_a , porém de outra maneira.

Para a rugosidade R_z as diferenças dos valores das médias de rugosidade medidas com o sistema de apalpação ótica e mecânica para as etapas do processo são $2x$, $2.5x$, $3x$ e $6x$ respectivamente para as etapas de alargamento, brunimento de desbaste, brunimento de semi-acabamento e brunimento de acabamento, reafirmando a maior sensibilidade do apalpador ótico para medição de vales.

10.5 Rugosidade R_{max}

A figura 10.14 mostra os resultados do brunimento, visando sua comprovação estatística, para as medições de rugosidade R_{max} realizadas com apalpador mecânico. Na figura 10.15, os resultados das medições de rugosidade fornecidas pelo sistema de apalpação ótico podem ser vistos. A figura 10.16 ilustra a comparação entre os resultados, referentes à rugosidade R_{max} , das condições de brunimento utilizadas. Estes resultados possuem confiabilidade de 85%.

O comportamento dos valores de rugosidade R_{max} médios medidos por apalpador mecânico ou ótico apresenta-se idêntico ao observado para a rugosidade R_z , nas duas condições de parâmetros de entrada otimizados.

O valor médio de rugosidade R_{max} , medido com o sistema de apalpação mecânico, obtido com a etapa de brunimento de acabamento, $1,46 \mu\text{m}$, figura 10.14, quando comparado ao especificado no projeto da peça $1,5 \mu\text{m}$, figura 8.1, mostra que o processo pode atender a este requisito.

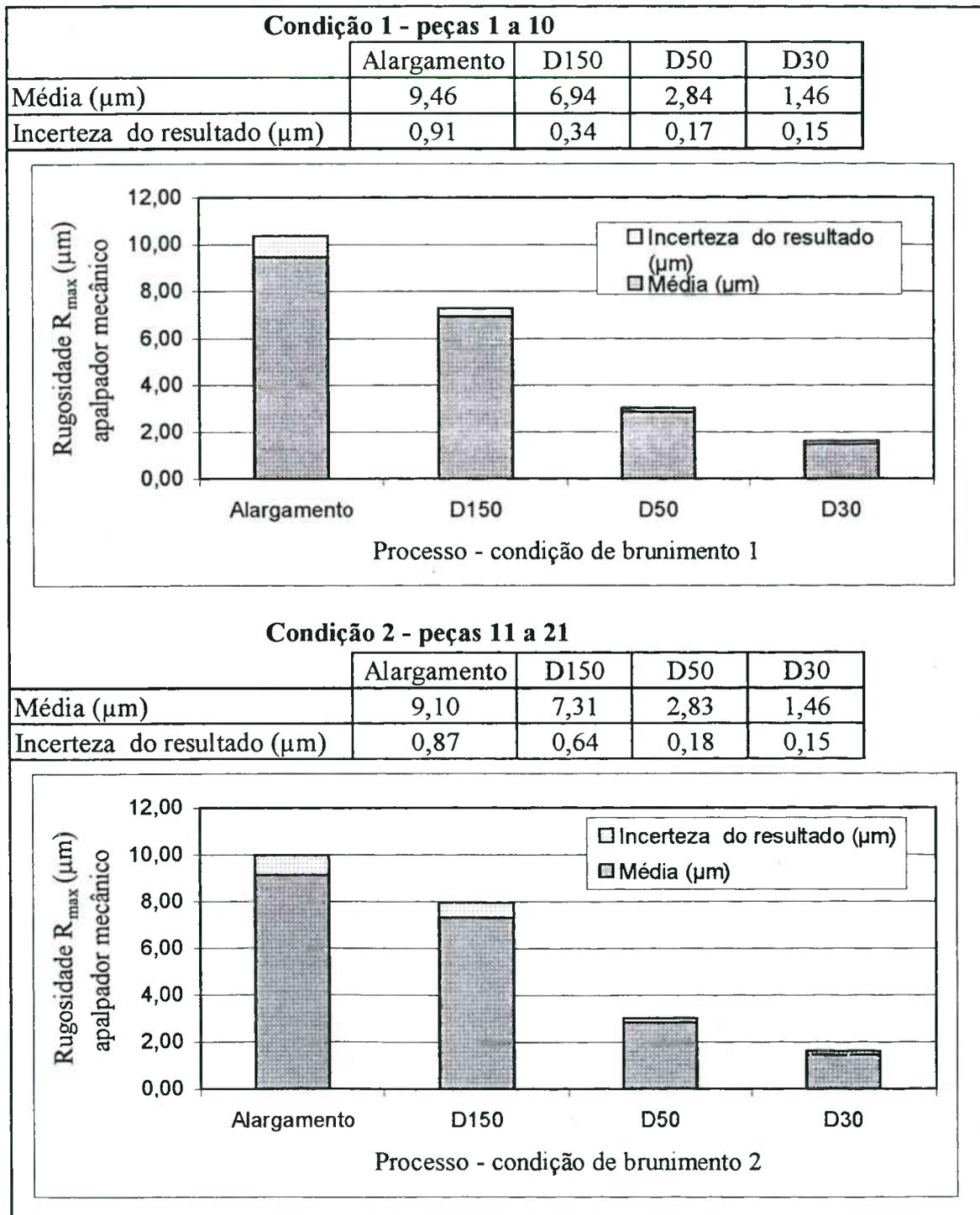


Figura 10.14 – Valores de rugosidade média R_{max} obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação mecânico

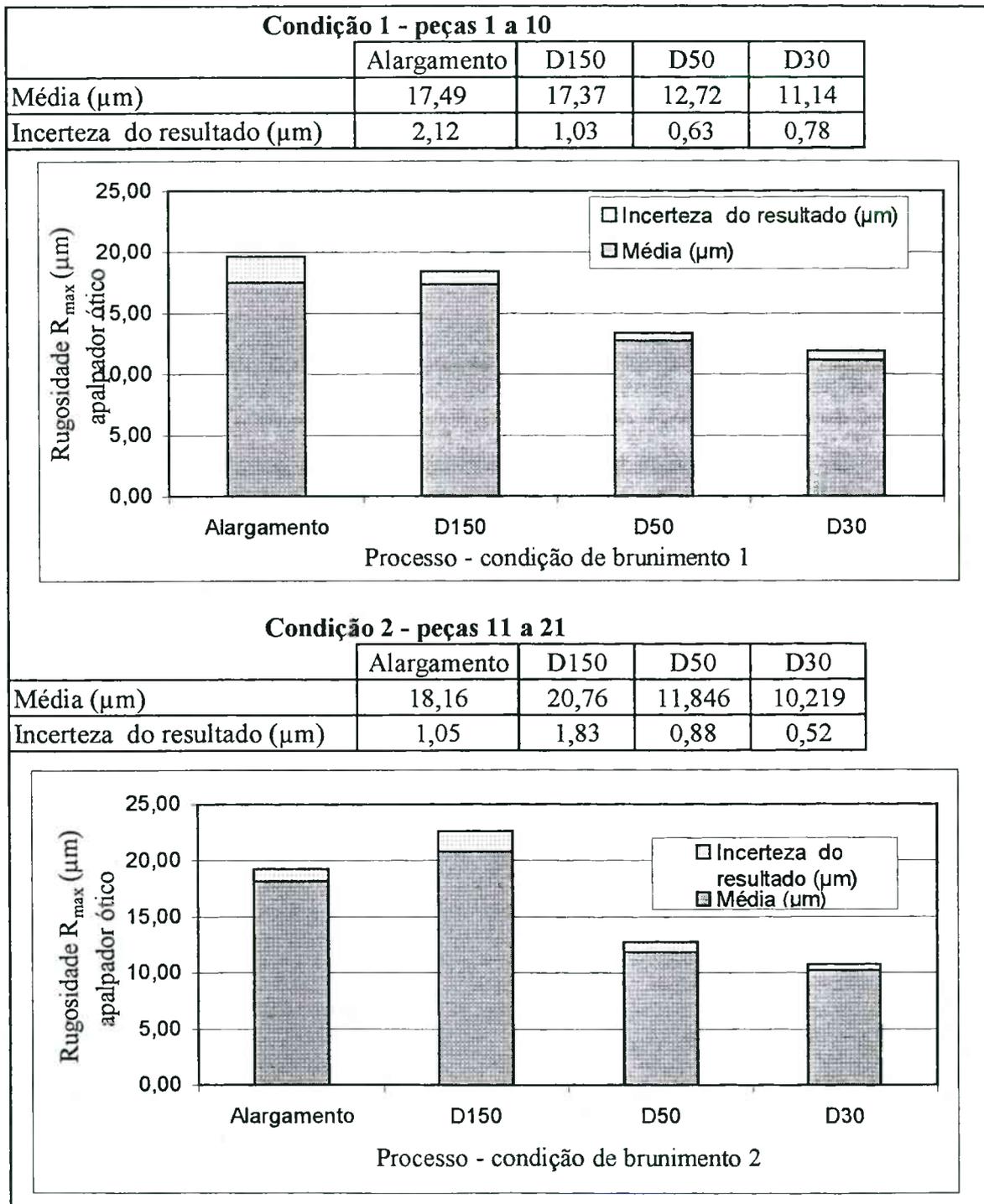


Figura 10.15 – Valores de rugosidade média R_{max} obtidos através do processo de brunimento com dados de entrada otimizados – medição com sistema de apalpação ótico

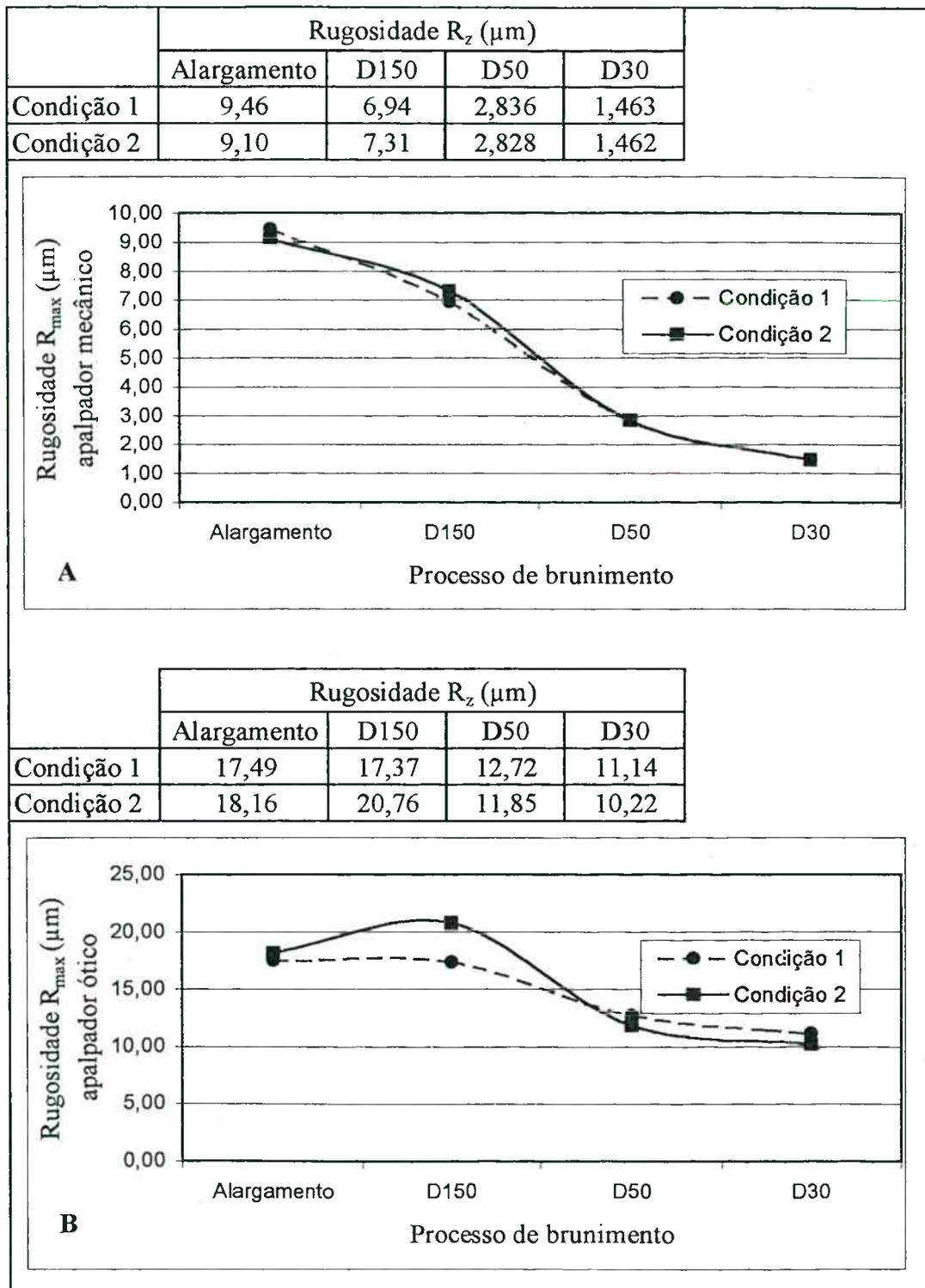


Figura 10.16 – Comparação dos valores de rugosidade R_{max} da superfície dos furos obtidos pelo processo de brunimento com condições de brunimento otimizadas –
A) apalpador mecânico, B) apalpador ótico

CAPÍTULO 11

AVALIAÇÃO DAS SUPERFÍCIES BRUNIDAS

A avaliação da textura de uma superfície, conforme definido no capítulo 7, é realizada através da análise da superfície, por meio da inspeção visual, e da medição da rugosidade, mediante os parâmetros de rugosidade.

O brunimento de passe único com ferramentas tipo bucha diamantada teve suas características de geração de superfícies avaliadas, através das medições dos parâmetros R_a , R_z e R_{max} , nos capítulos anteriores. Como resultados obteve-se uma tendência de redução dos valores desses parâmetros de rugosidade com o aumento da velocidade periférica e com a redução do tamanho dos grãos abrasivos que recobrem as ferramentas de brunimento.

Neste capítulo as superfícies geradas pelo brunimento serão analisadas por intermédio de imagens obtidas através de microscópio eletrônico de varredura.

Como corpos de prova foram utilizados, mais uma vez, carcaças de válvulas hidráulicas com pré-usinagem de alargamento. Foram selecionadas as velocidades periféricas de 16, 20, 26 e 31 m/min e velocidades axiais de 1,0, 1,4 e 1,8 m/min para as ferramentas de desbaste, semi-acabamento e acabamento. Para cada condição de usinagem foram brunidas 3 peças.

Também foram investigadas superfícies que receberam tratamento de escovamento, para melhoria do acabamento, após a ferramenta de acabamento. As escovas utilizadas são formadas por uma haste de metal onde, na sua extremidade, são fixadas cerdas plásticas flexíveis. Nas extremidades das cerdas existem esferas de material abrasivo, carboneto de silício, com grãos tamanho 320 MESH (BRM, 1987). A escova, como as ferramentas de brunir, passam apenas uma vez através do furo. A figura 11.1 ilustra estas escovas.

A medição de rugosidade foi realizada com o sistema de apalpação mecânico para a verificação do comportamento dos parâmetros da família R_k , cujos valores não foram tratados estatisticamente pois o software e interface do equipamento que calcula estes parâmetros não estava completamente dominado até o momento em que foram realizadas estas medições.

Nesta etapa do trabalho não foram consideradas as características geométricas produzidas pelo processo, exceto na avaliação do resultado do brunimento realizado com a ferramenta de desbaste sem o condicionamento dos grãos abrasivos por dressamento.

Após o brunimento as peças foram seccionadas para possibilitar o livre acesso à

superfície brunida para medição e documentação fotográfica.

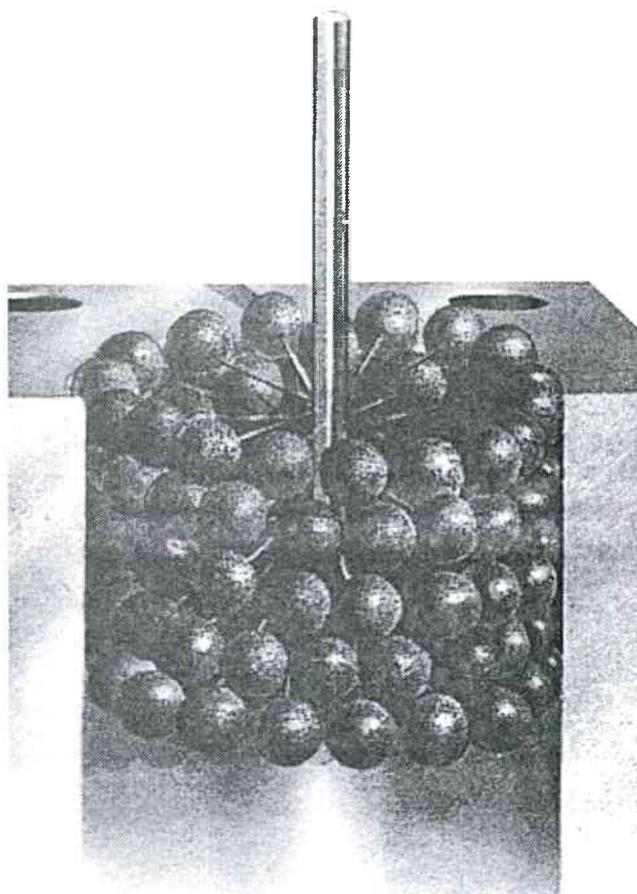


Figura 11.1 – Escova utilizada para acabamento de superfícies brunidas (BRM, 1987)

11.1 Superfície alargada

A superfície alargada é o ponto de partida para todas as outras superfícies produzidas pelo processo de brunimento. A tabela 11.1 mostra as medições de rugosidade realizadas nesta superfície.

Tabela 11.1 – Medição da textura da superfície alargada

	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
Apalpador mecânico	1,40	7,32	12,74	19,74	5,62	2,85	1,35
Apalpador ótico	2,10	13,47	17,69	17,73			

A figura 11.2 mostra a imagem da superfície do corpo de prova, obtida pela operação de alargamento, com diferentes ampliações.

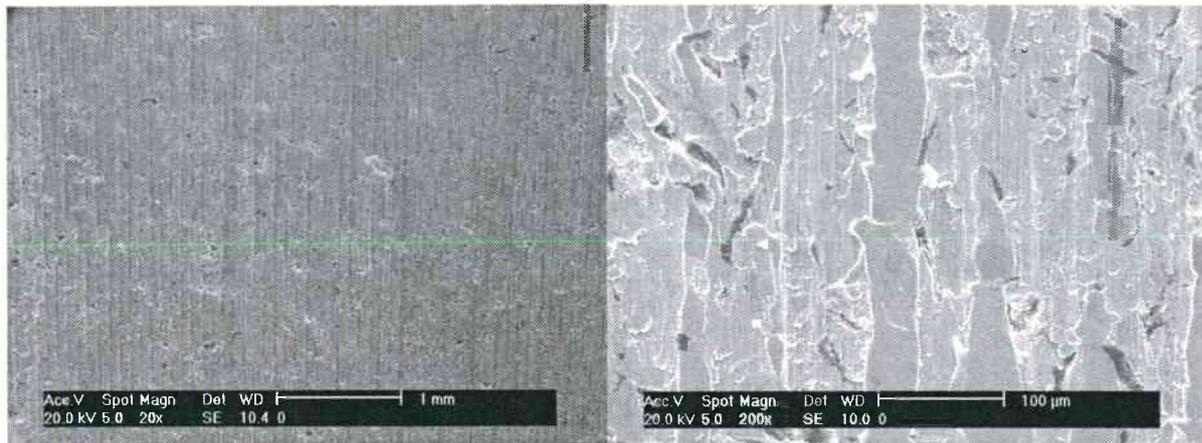


Figura 11.2 – Superfície alargada. Ampliação de 20x (esquerda) e 200x (direita)

Observa-se a ocorrência de uma superfície em que o material sofreu severas deformações resultando em um aspecto de amassamento ou esmagamento. Muitos defeitos, crateras, podem ser observados, possivelmente resultantes do arrancamento do material pelo gume de corte e posterior amassamento, pelas guias da ferramenta, do material restante sobre as crateras.

Algumas amostras foram seccionadas transversalmente e longitudinalmente para uma análise do perfil de rugosidade resultante na superfície, conforme ilustra a figura 11.3.

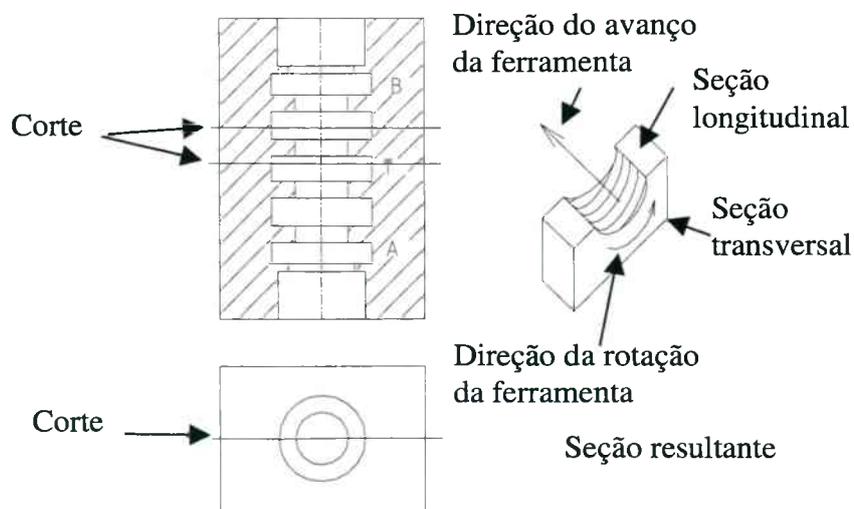


Figura 11.3 – Seções realizadas nos corpos de prova para análise microscópica

A figura 11.4 mostra a seção longitudinal de um furo alargado, com o objetivo de demonstrar o perfil de rugosidade produzido, na qual foi sobreposta o perfil obtido da medição de rugosidade.

Nesta figura nota-se que o perfil da rugosidade obtido com o rugosímetro descreve a superfície adequadamente. Da tabela 11.1 verifica-se que o valor médio da rugosidade R_k é maior que os valores de R_{pk} e R_{vk} , indicação de que a área de transição entre picos e vales é grande e que as áreas de pico e de vale são semelhantes, como pode ser comprovado na fotografia 11.4.

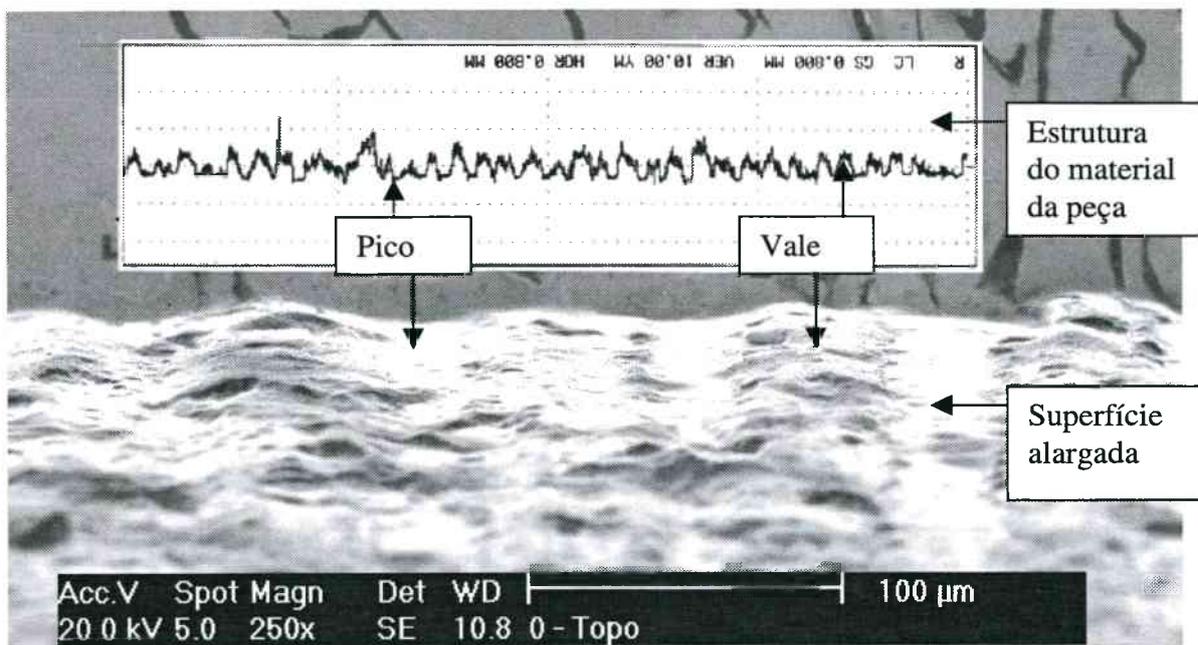


Figura 11.4 – Fotografia da seção longitudinal do furo alargado

11.2 Superfícies e características geométricas produzidas pelo brunimento com ferramenta de desbaste sem dressamento da camada abrasiva.

Os corpos de prova, pré-usinados com a operação de alargamento, foram brunidos com velocidade periférica de 20 m/min e velocidade axial de 1,2 m/min.

Durante a operação de brunimento ocorreu o aparecimento de forte ruído, atípico nessa operação, indicando que problemas estavam ocorrendo. Apenas duas peças foram brunidas, ocorrendo o colapso da ferramenta durante o brunimento da terceira peça.

Na tabela 11.2 estão as medidas realizadas nos corpos de prova após a operação de alargamento. Na tabela 11.3 os dados são referentes à operação de brunimento de desbaste.

Tabela 11.2 – Medições de rugosidade das amostras – alargamento

Peça	Diâmetro (mm)	Cilindricidade (μm)	Rugosidade R_a (μm)	Rugosidade R_z (μm)	Rugosidade R_{max} (μm)	Rugosidade R_y (μm)
24	11,9284	5,00	1,43	6,97	9,40	18,80
25	11,9284	4,69	1,42	8,40	11,75	17,63

Tabela 11.3 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramenta sem condicionamento dos grãos de diamante

Peça	Diâmetro (mm)	Cilindricidade (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
24	12,0244	75,61	2,08	21,71	22,61	26,24	15,42	3,45	5,80
25	11,9972	59,93	2,27	19,24	23,84	59,20	5,76	3,50	3,13

Os resultados comprovam que realmente ocorreram graves problemas durante o brunimento, sendo que todas as condições iniciais, tanto de geometria quanto de textura da superfície, tornaram-se piores, principalmente para as medidas do diâmetro e do erro de cilindridade.

A ferramenta de desbaste possui grãos indicados para grandes remoções de material que, se não passarem pela etapa de dressamento, são muito agressivos, com tendência de se encravarem na parede do furo que está sendo brunido.

A ação intermitente de encravamento e remoção do material realizada pelos grãos abrasivos leva à instabilidade do processo de brunimento, causando o aparecimento de vibrações e, conseqüentemente, de ruídos. A instabilidade criada pelo encravamento dos grãos é suficiente para que os furos produzidos sejam totalmente danificados.

A figura 11.5 mostra a medição do erro de circularidade e de cilindridade de uma das peças, demonstrando que o erro de circularidade produzido é bastante alto mas o erro de cilindridade é cerca de 7 vezes maior. Esta característica indica que ocorreu o desvio da direção do deslocamento da ferramenta dentro do furo.

A textura da superfície produzida é totalmente amorfa, com o arrancamento de grandes porções de material e dobramento de material sobre as crateras formadas pelo arrancamento, conforme ilustram as figura 11.6 e figura 11.7.

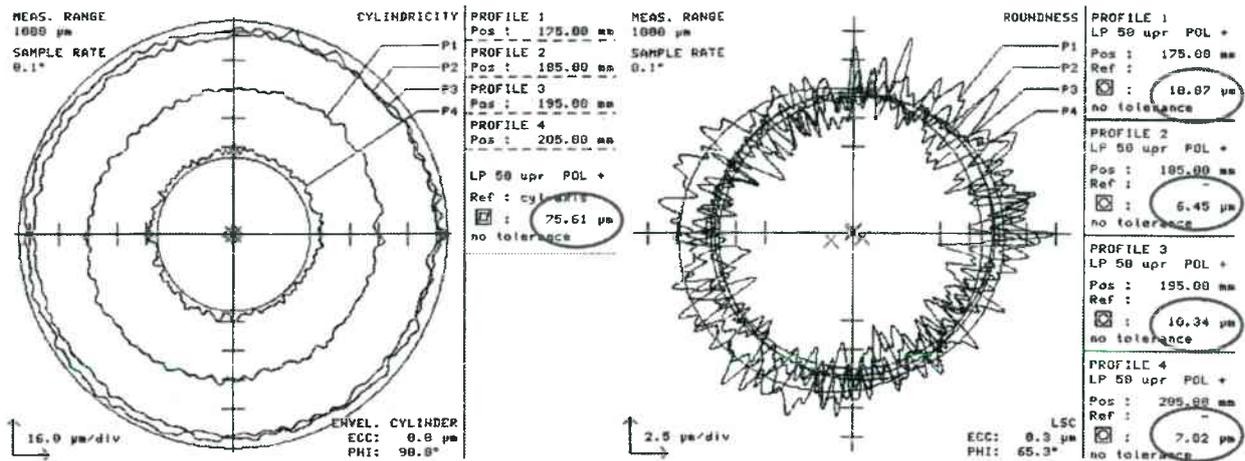


Figura 11.5 – Erros de circularidade (direita) e cilindricidade (esquerda) produzidos pelo brunimento de desbaste com ferramenta sem a operação de dressamento dos grãos abrasivos

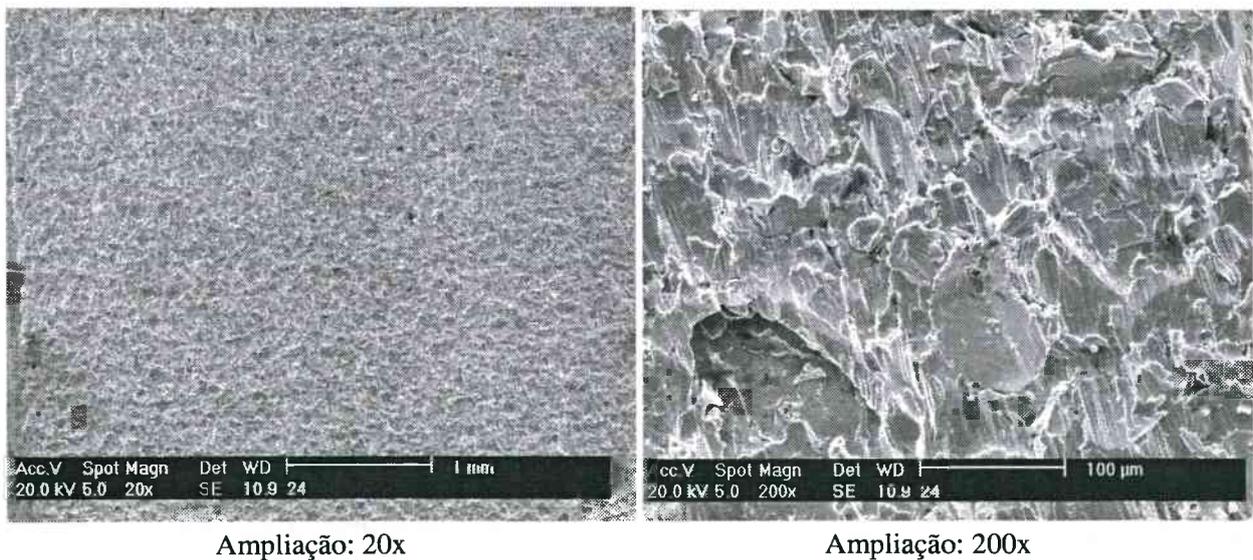


Figura 11.6 – Textura superficial produzida pelo brunimento de desbaste com ferramenta sem a operação de dressamento dos grãos de diamante

O perfil de rugosidade é semelhante ao obtido para a superfície alargada e os valores de rugosidade R_k também são semelhantes, indicando que a área da região que contém os picos é equivalente à área dos vales.

11.3 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta de desbaste (grão D150)

A tabela 11.4 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_k , que descrevem a superfície.

O valor médio da rugosidade R_k é maior que os valores de R_{pk} e R_{vk} , sendo estes equivalentes. Esta relação indica que as áreas dos vales e as áreas de suporte são equivalentes.

A figura 11.8 e 11.9 ilustra as superfícies obtidas através do brunimento com ferramenta de desbaste.

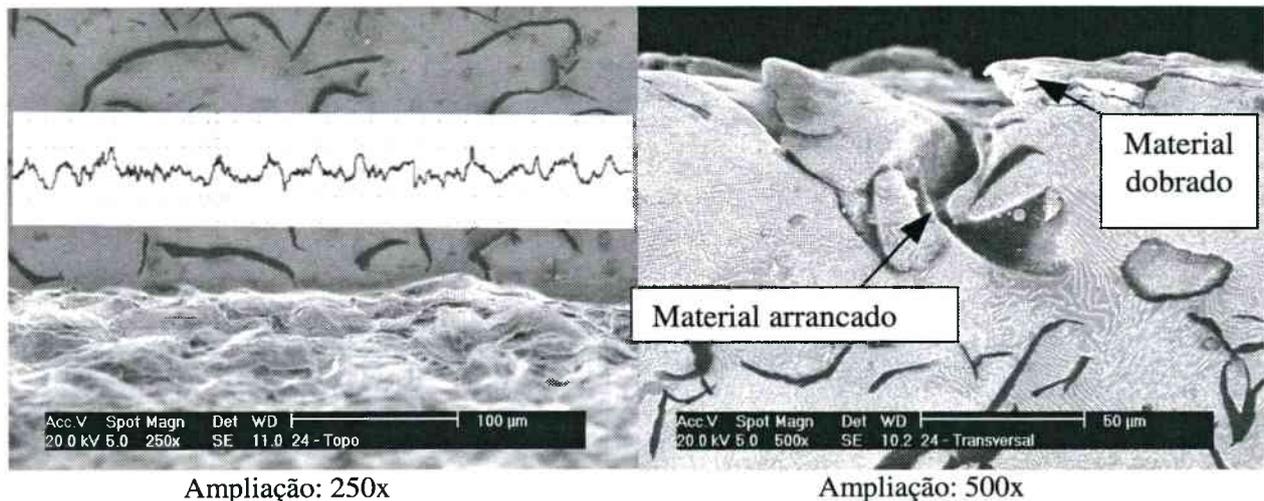


Figura 11.7 – Fotografia da seção longitudinal (esquerda) e transversal (direita) do furo brunido com ferramenta de desbaste sem dressamento

A fotografia 11.8a mostra a superfície brunida com velocidade periférica de 16 m/min e velocidade axial de 1,8 m/min. O ângulo de brunimento, α , que é a direção do ângulo da velocidade de corte, figura 5.5, é de 6° . A figura 11.8b é uma descrição tridimensional da topografia da superfície anterior obtida pelo rugosímetro com apalpador mecânico. A descrição tridimensional da textura mostra mais detalhes da superfície que a fotografia, entretanto não permite que sejam realizadas investigações mais profundas, com maiores ampliações.

Comparando as superfícies brunidas com velocidade periférica de 16 m/min, nota-se que o maior avanço axial, 1,8 m/min, figura 11.8c, provoca mais defeitos que o avanço de 1,0 m/min, figura 11.8d. Esses defeitos são na forma de material deformado plasticamente no sentido da velocidade de corte produzindo escamas, tal como observado por SOLAROLI, 1997. Tais defeitos também são detectados na figura 11.9a ($v_r = 26$ m/min e $v_o = 1,8$ m/min) e 11.9b ($v_r = 26$ m/min, $v_o = 1,4$ m/min).

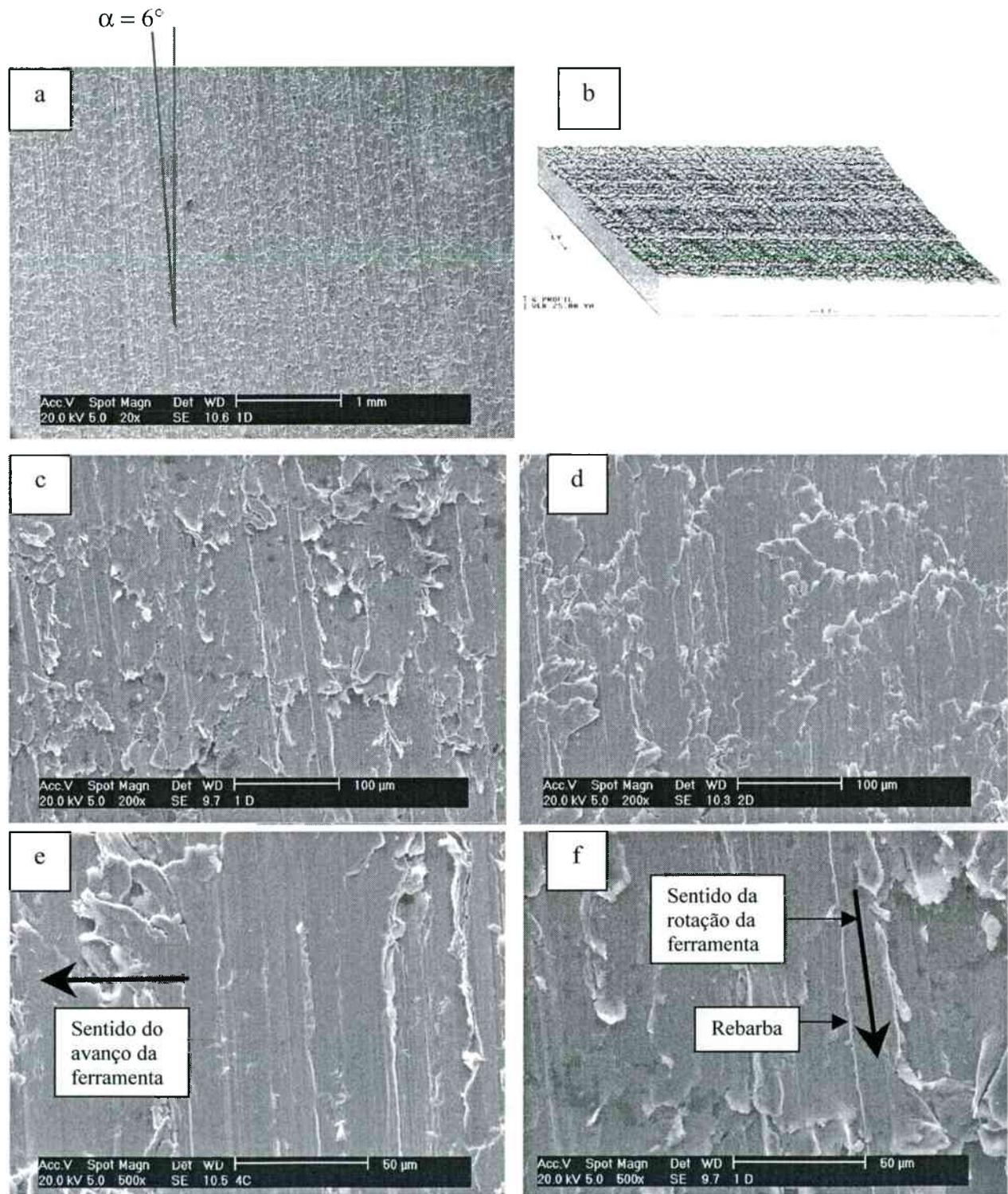


Figura 11.8 – Fotografias e caracterização tridimensional da superfície brunida – D150

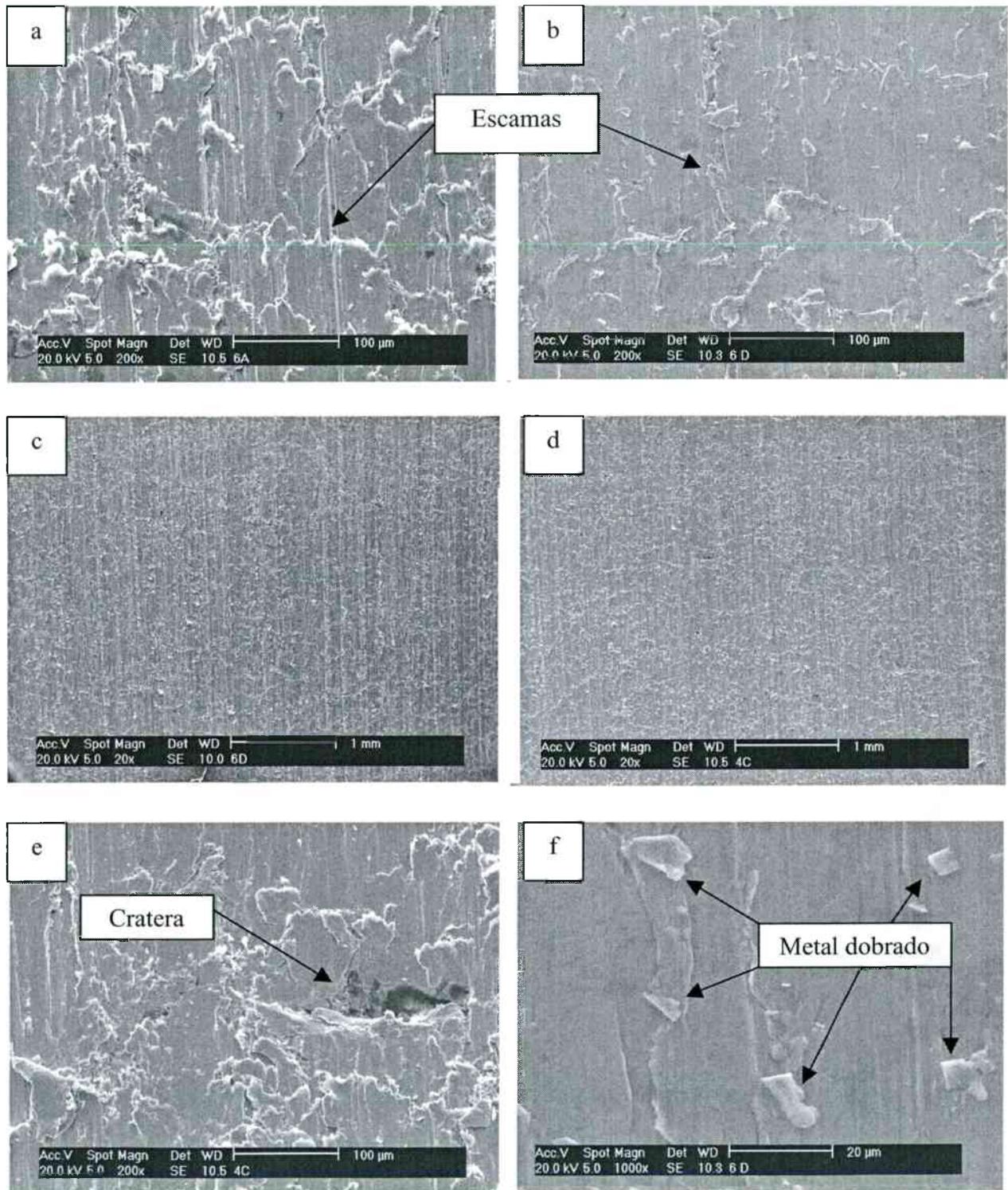


Figura 11.9 – Fotografia da textura e defeitos da superfície brunida – D150

Pequenas ampliações não permitem que as diferenças na textura da superfície produzidas pela variação dos dados de corte sejam percebidas, figura 11.9c ($v_r = 20$ m/min) e 11.9d ($v_r = 26$ m/min) ambas com ampliação de 20x.

As fotografias 11.9e e 11.9f mostram defeitos produzidos pelo brunimento. O arrancamento de material, observado por BRM, 1987, JUCHEM, 1986 e BALINSKIJ, 1991, deve-se à remoção das partículas de grafita e o subsequente esmagamento e arrancamento das bordas remanescentes.

Tabela 11.4 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramenta de desbaste

Vel. perif. (m/min)	Vel. axial (m/min)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
16	1,0	1,38	9,39	11,11	11,11	4,43	2,33	2,13
16	1,8	1,71	9,74	10,28	10,32	5,58	1,91	1,72
20	1,0	1,30	8,82	10,07	10,28	4,54	1,87	2,17
20	1,8	1,46	9,56	12,05	12,05	4,43	1,82	2,82
26	1,4	1,44	9,04	11,25	11,25	4,32	1,48	2,56
26	1,8	1,41	8,74	9,83	9,83	4,69	1,63	2,36

A severa deformação plástica ocorrida na superfície do furo, como mostram as fotografias, são devido, segundo MILLER, 1996, ao repetido sulcamento imposto à superfície pela passagem de um grande número de partículas de diamante orientadas desfavoravelmente, como ilustra a figura 11.10, que mostra a disposição dos grãos de diamante na superfície da ferramenta de desbaste.

A disposição dos grãos mostrada na figura 11.10 fará com que o material de uma pequena área da superfície da peça seja deformado e removido por diversas partículas abrasivas. O metal que não é removido pelo grão de diamante é deformado e “escorre” para os lados e por baixo dos grãos de diamante, sendo novamente deformado pelos grãos dispostos lateralmente ao primeiro e pelos que se encontram atrás.

O aparecimento de metal dobrado, figura 11.9f, parece não possuir explicação evidente. Pode ter sido causado quando a ferramenta retorna, após atingir o final do curso de brunimento, arrastando as extremidades das escamas, embora pareça improvável, pois ela retorna com o

mesmo sentido de rotação com que realiza a remoção de material. Nesse caso, o dobramento teria que se apresentar no sentido axial e não acompanhando o sentido da velocidade de corte.

Outra causa para esta imperfeição pode ser a insuficiente remoção dos cavacos da zona de corte, que seriam re-soldados na superfície, como descrito por MILLER, 1996. Este autor ainda confere a este defeito, metal dobrado, o aparecimento de picos durante a medição de erro de circularidade e cilindricidade, figura 9.3.

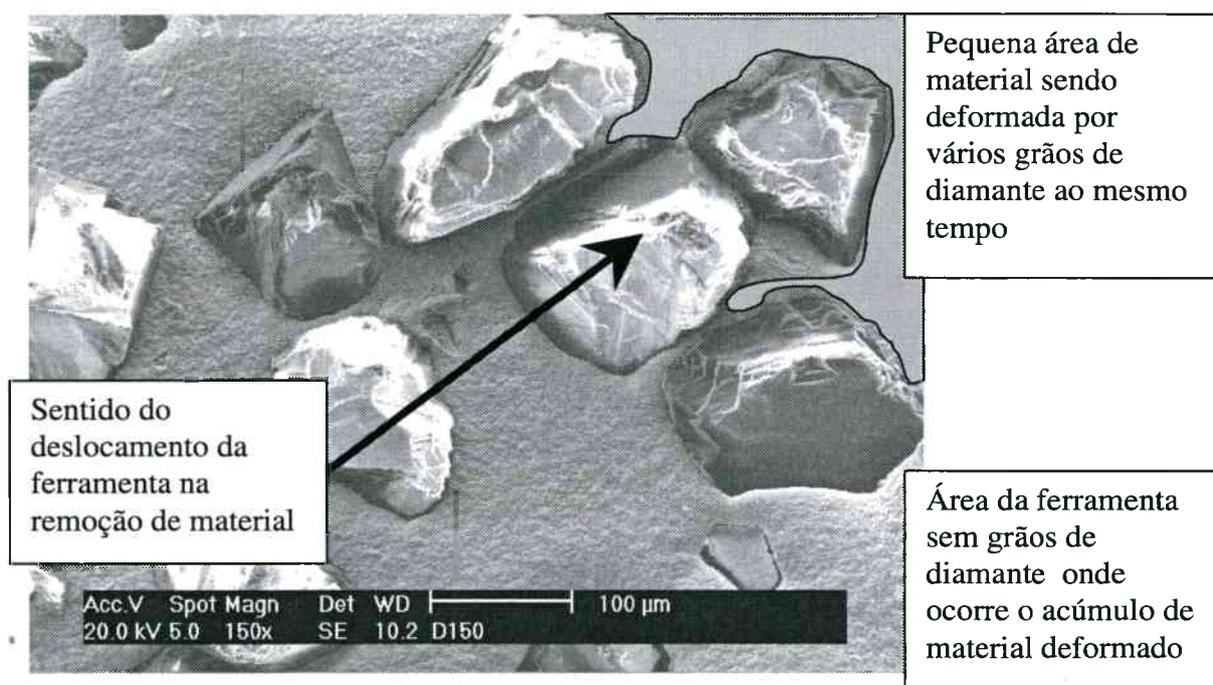


Figura 11.10 – Distribuição irregular dos grãos de diamante na ferramenta

Neste estudo notou-se que em algumas medições de rugosidade, mesmo nas medições de superfícies brunidas com a ferramenta de acabamento, ocorreu o aparecimento de picos de rugosidade não condizentes com a característica de uma superfície produzida pelo brunimento e que prejudicam o cálculo dos valores dos parâmetros de rugosidade, figura 11.11. Esses picos provavelmente são decorrentes da passagem do apalpador sobre o material dobrado citado anteriormente e mostrado na figura 11.9f.

11.4 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta de semi-acabamento (grão D50)

Os valores médios de rugosidade da família R_k são mostrados na tabela 11.5.

O parâmetro R_k continua sendo o maior valor, comparado aos valores de R_{pk} e R_{vk} .

Entretanto, os valores de R_{vk} tornaram-se levemente maiores que os valores de R_{pk} , uma indicação de que a altura dos picos do perfil foi reduzida.

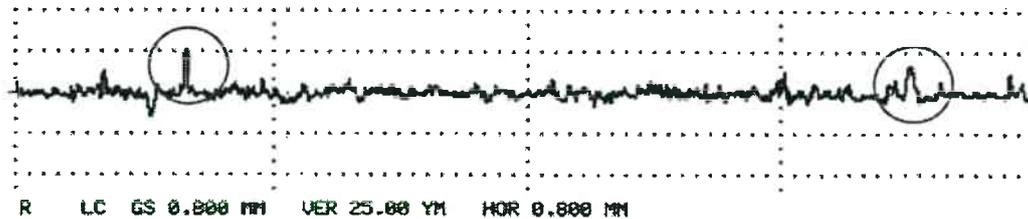


Figura 11.11 – Picos de rugosidade devido ao material dobrado sobre a superfície brunida

Tabela 11.5 – Medições de rugosidade das amostras brunidas com ferramenta de semi-acabamento

Vel. perif. (m/min)	Vel. axial (m/min)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
16	1,0	0,36	2,50	3,05	3,10	1,10	0,45	0,73
16	1,8	0,58	3,70	4,05	4,82	1,81	0,70	0,87
20	1,0	0,42	2,89	3,15	3,33	1,32	0,59	0,52
20	1,8	0,54	4,40	4,75	5,43	1,58	0,82	1,22
26	1,4	0,44	3,35	3,94	3,94	1,34	0,68	0,67
26	1,8	0,53	4,17	5,04	5,12	1,55	0,76	1,44

A figura 11.12 ilustra as superfícies obtidas através do brunimento com ferramenta de semi-acabamento.

As fotografias 11.12a e b, ambas com ampliação de 200x, referem-se às superfícies brunidas com grãos de diamante D50 e velocidade periférica de 16 m/min com velocidade axial de 1,8 e 1,0 m/min, respectivamente. A diferença marcante entre as superfícies é o corte mais limpo realizado com o avanço axial menor, 11.12b, com muito menos deformação do material e formação de rebarbas.

Nas figuras 11.12c e d, a ferramenta de brunimento realizou a remoção de material com velocidade periférica de 20 m/min e avanços de 1,8 e 1,0 m/min, respectivamente, enquanto que nas superfícies das figuras 11.12e e 11.12f a velocidade periférica utilizada foi 26 m/min e o avanço 1,8 e 1,4 m/min, respectivamente. Ainda ocorre a formação de camadas de material

deformado dispostas em escamas e material dobrado.

A superfície que apresentou o melhor aspecto foi a brunida com velocidade e avanço menores, 16 m/min e 1,0 m/min, justamente a superfície cuja medição de rugosidade forneceu os menores valores, tabela 11.15.

A figura 11.13 apresenta as mesmas superfícies, a partir da fotografia 11.12b, com uma ampliação de 1000x. A fotografia 11.13a ilustra o sulco formado na superfície por um grão de diamante com o levantamento de rebarbas para os lados, característica da usinagem com gumes de geometria não-definida. Em todas as superfícies nota-se o arraste de material causado pela passagem dos grãos abrasivos com a deposição de material sobre os sulcos formados por outros grãos e sobre crateras causadas pela retirada da grafita lamelar, constituinte do ferro fundido cinzento, figura 11.13c, 11.13d e 11.13e.

Os sulcos formados pelos grãos abrasivos podem ser vistos também na figura 11.13f, que mostra a seção longitudinal do furo, brunido com velocidade periférica de 16 m/min e avanço axial de 1,0 m/min, evidenciando o perfil da rugosidade obtido.

11.5 Superfícies geradas pelo brunimento com ferramenta de acabamento (grão D30)

Os valores médios de rugosidade da família R_k é mostrada na tabela 11.6.

Tabela 11.6 – Medições das amostras brunidas com ferramenta de acabamento

Vel. perif. (m/min)	Vel. axial (m/min)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
16	1,0	0,16	1,49	1,84	1,84	0,51	0,24	0,31
16	1,8	0,22	1,75	1,95	2,29	0,61	0,32	0,54
20	1,0	0,17	1,37	1,67	1,67	0,49	0,24	0,38
20	1,8	0,21	1,75	1,84	1,91	0,67	0,29	0,48
26	1,4	0,22	1,50	1,61	1,61	0,73	0,23	0,34
26	1,8	0,19	1,79	2,55	2,78	0,52	0,21	0,80
31	1,4	0,19	1,75	2,00	2,00	0,60	0,30	0,39
31	1,8	0,21	1,79	1,98	1,98	1,55	0,76	1,44

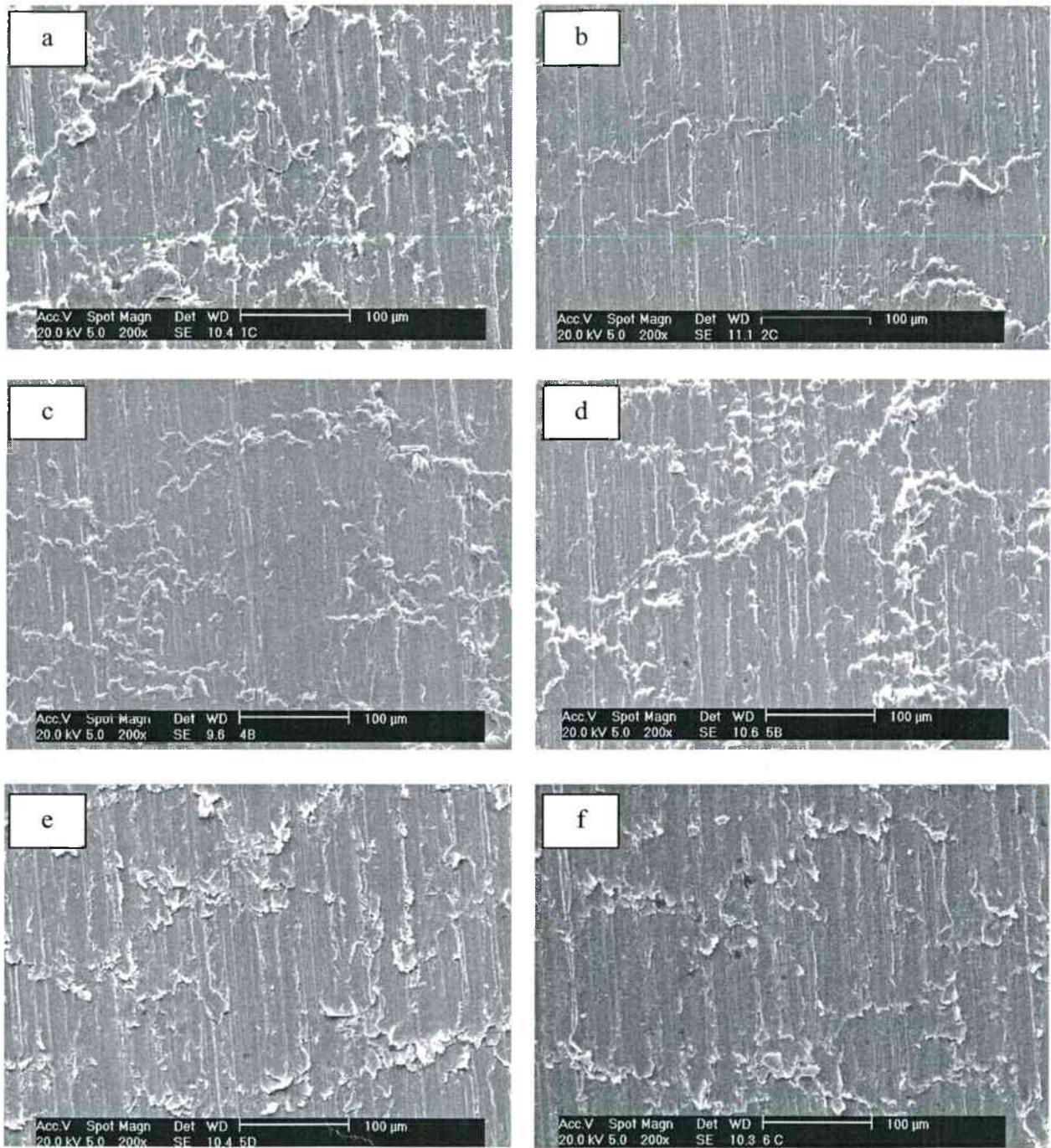


Figura 11.12 – Superfícies obtidas com o brunimento de passe único com ferramentas de semi-acabamento – D50

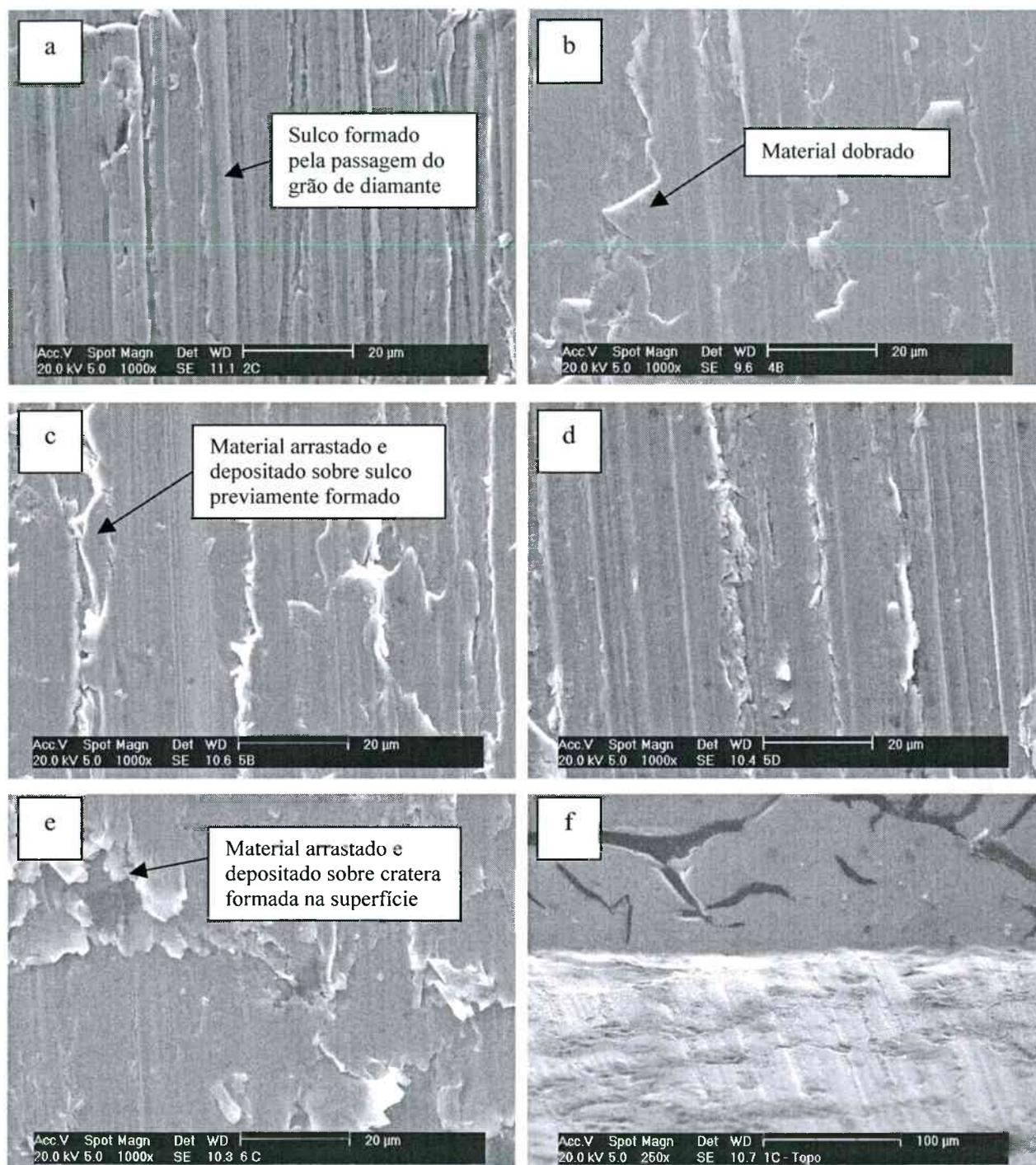


Figura 11.13 – Superfícies obtidas com o brunimento de passe único com ferramentas de semi-acabamento – D50

A figura 11.14 mostra os perfis de rugosidade obtidos nas medições de rugosidade das etapas de brunimento de desbaste semi-acabamento e acabamento.

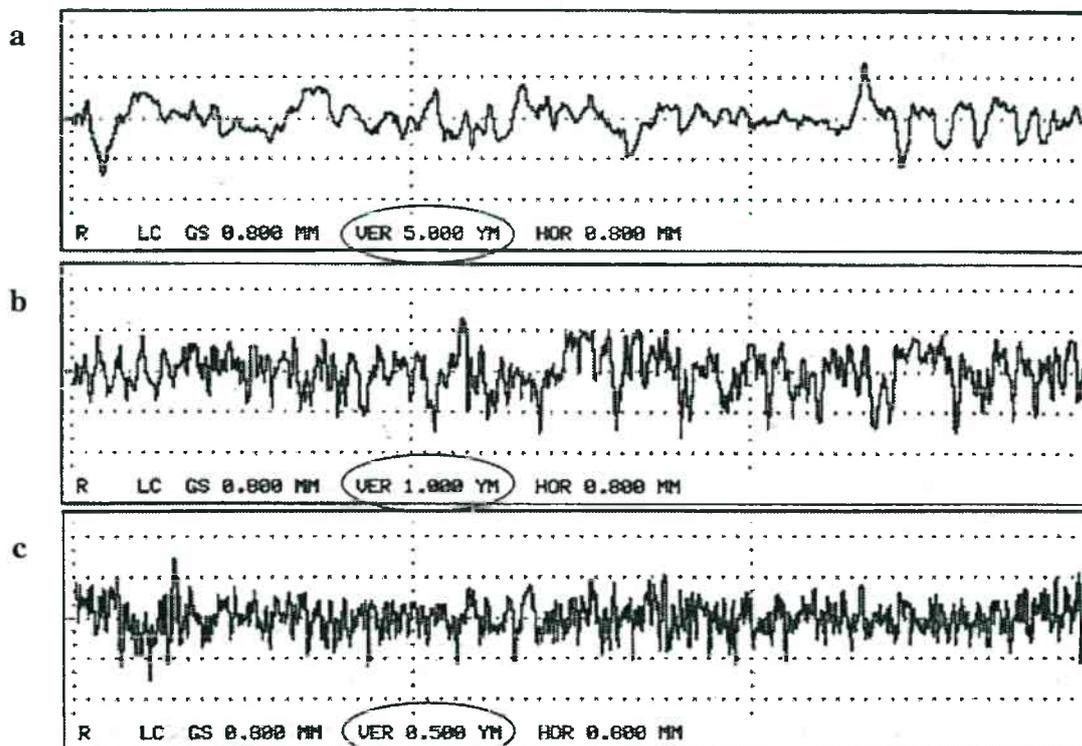


Figura 11.14 – Perfis de rugosidade das superfícies analisadas. Brunimento de desbaste (a), semi-acabamento (b) e acabamento (c)

Os perfis obtidos são coerentes com os valores médios de rugosidade da família R_k apresentados durante todas as etapas do processo de brunimento. Pode-se notar que existe uma grande região de transição entre a região de picos e de vales, o que leva à obtenção de altos valores do parâmetro R_k , conforme definição do parâmetro no anexo 1. A região dos picos diminui de acordo com as etapas do processo, do brunimento de desbaste até o brunimento de acabamento, refletida na diminuição dos valores médios da rugosidade R_{pk} e aumento dos valores do parâmetro R_{vk} .

Na tabela 11.7 podem ser verificados os valores de rugosidade obtidos nas superfícies que foram escovadas. A operação de escovamento não proporcionou uma redução significativa nos valores dos parâmetros de rugosidade.

A figura 11.15 mostra um gráfico que apresenta as tendências dos valores dos parâmetros da família R_k de acordo com o prosseguimento do processo de brunimento.

O parâmetro R_k , que representa a região central da curva de área de suporte, tende a diminuir com a utilização de ferramentas com grãos de diamante de menor tamanho.

Tabela 11.7 – Valores de rugosidade medidos em superfícies brunidas e escovadas

Vel. perif. (m/min)	Vel. axial (m/min)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_y (μm)	R_k (μm)	R_{pk} (μm)	R_{vk} (μm)
31	1,0	0,23	2,28	2,54	2,65	0,71	0,43	0,63
31	1,4	0,22	2,10	2,31	2,63	0,68	0,43	0,40
38	1,4	0,13	1,22	1,38	1,58	0,41	0,20	0,25
38	1,8	0,18	1,74	2,15	2,15	0,54	0,41	0,35

O parâmetro R_{pk} também diminui do início do processo, superfície alargada, até o brunimento de acabamento. A curva do parâmetro R_{vk} confirma a observação realizada no capítulo 10, confirmação dos resultados, onde a curva do parâmetro R_z também apresentou tendência de elevação entre as etapas de alargamento e brunimento de desbaste.

Todavia o parâmetro R_z não fornecia informações sobre a causa desta tendência, formação de picos ou de vales. Os parâmetros da família R_k , como dividem o perfil em três regiões, anexo 1, permitem garantir que o aumento da rugosidade entre as etapas de alargamento e de brunimento de desbaste deve-se à formação de sulcos profundos, ou vales, na superfície do furo com a passagem dos grãos de diamante de desbaste.

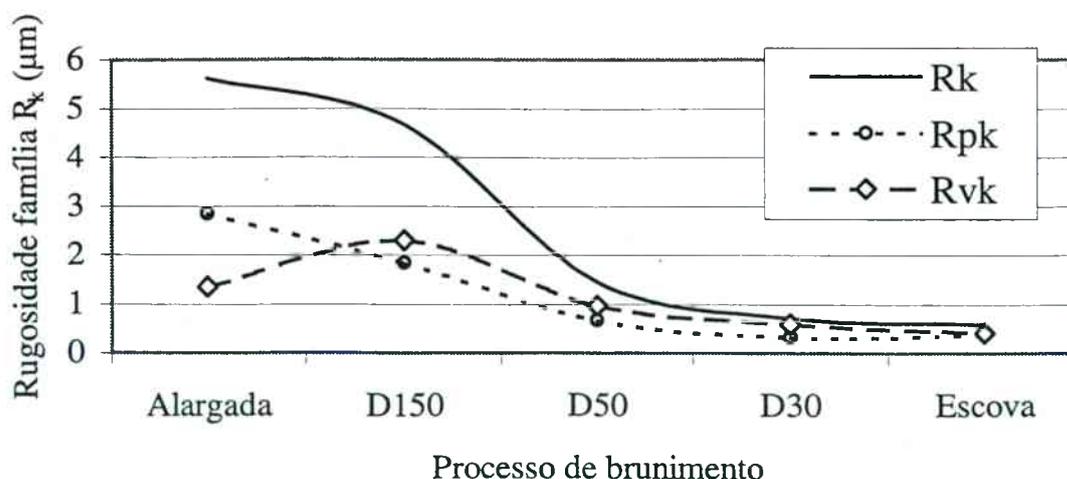


Figura 11.15 – Curvas dos parâmetros de rugosidade da família R_k para o processo de brunimento

A superfície acabada do furo apresenta valores do parâmetro R_{vk} maiores que os valores de R_{pk} . Entretanto, como a região central de transição, R_k , possui valores altos, não podemos afirmar que a superfície produzida é uma superfície platafórmica.

Para a obtenção de uma superfície platafórmica com este processo a ferramenta de semi-acabamento deveria ser recoberta com grãos abrasivos de tamanho maior para que os sulcos formados não sejam removidos com o sobremetal deixado para a operação de acabamento.

Os valores dos diâmetros do furo entre as etapas de brunimento de semi-acabamento e acabamento, anexo 7, indicam que o sobremetal restante para a operação de acabamento é da ordem de 5 a 6 μm no diâmetro, enquanto que a rugosidade R_z , medida com o sistema de apalpação ótico, anexo , encontra-se na faixa de 3 a 4 μm . Assim, a remoção de material realizada pela ferramenta de acabamento elimina a maioria dos sulcos produzidos pela operação anterior.

As figuras 11.16 e 11.17 mostram as fotografias das superfícies brunidas com a ferramenta de acabamento e as superfícies que foram escovadas após a operação de acabamento.

A operação de escovamento promove uma limpeza na superfície do furo, como pode ser observado nas fotografias 11.16a e b. A superfície da fotografia 11.16a foi obtida pelo brunimento de acabamento com $v_r = 16$ m/min e $v_o = 1,8$ m/min. A superfície da figura 11.16b, por sua vez, foi produzida pelo brunimento com os mesmos dados anteriores e posteriormente escovada com $v_r = 31$ m/min e $v_o = 1,8$ m/min.

Uma maior ampliação destas superfícies, figura 11.16c e 11.16d, mostram que a escova retirou boa parte do metal dobrado e re-soldado sobre a superfície, deixando-a mais limpa.

Maiores velocidades periféricas, $v_r = 31$ m/min, e menores velocidades axiais, $v_o = 1,4$ m/min, produziram superfícies com aparência semelhante à superfície escovada, como demonstram as fotografias 11.16e e 11.16f, indicando uma melhora no acabamento da superfície do furo. Entretanto, esta melhora visual não foi refletida nos parâmetros de rugosidade, conforme pode ser visto na tabela 11.5. A razão para isso é que os apalpadores de medição de rugosidade descrevem uma linha reta e não varrem a superfície completamente.

Mesmo a ferramenta de acabamento, com grãos de diamante tamanho D30, produz defeitos de arraste de material na superfície, depositando-o sobre os sulcos formados pela operação anterior ou por outros grãos da camada abrasiva da ferramenta de acabamento. A ocorrência de metal dobrado também é verificada para esta etapa de trabalho, como ilustram as figuras 11.17a, 11.17b e 11.17c. A figura 11.17c mostra, entretanto, que o escovamento não retira todas as imperfeições da superfície.

Por fim, as figuras 11.17e e 11.17f ilustram mais defeitos encontrados nas superfícies brunidas com a ferramenta de acabamento como manchas de gordura, crateras e deformação com arraste de material. Deve-se notar, entretanto, que tais defeitos situam-se na ordem de milésimos de milímetro. As manchas de gordura devem-se à penetração do óleo de corte ou de proteção nos poros formados pelo arrancamento da grafita lamelar do ferro fundido.

As figuras 11.18b e 11.18d ilustram a ocorrência da remoção da grafita lamelar e o posterior arraste de material que preenche o vazio deixado pela grafita removida. A figura 11.18a mostra a seção longitudinal do furo alargado que não apresenta defeitos como crateras e deformação do material.

As figuras 11.18b e 11.18d são seções transversais com a mesma ampliação, sendo que a primeira é resultado do brunimento de acabamento, grão D30, e a segunda resulta do brunimento de desbaste, grão D150, cuja camada abrasiva da ferramenta não foi dressada. Na figura 11.18d, as linhas em forma de “V” representam a passagem do gume do grão abrasivo provocando grande deformação do material adjacente.

O mesmo ocorreu na superfície da figura 11.18e, brunimento com ferramenta de desbaste sem condicionamento dos grãos de diamante. Nota-se uma grande porção de material arrancado e forte deformação do material que foi arrastado sobre a cratera, resultado da grande agressividade dos grãos.

A operação de escovamento produz o perfil apresentado na figura 11.18c.

A fotografia 11.18f diz respeito à superfície da bucha abrasiva da ferramenta de acabamento. Pode-se identificar os grãos de diamante tamanho D30 engastados no ligante com apenas uma pequena porção do gume exposto. Esta figura apresenta uma possível causa do material re-soldado e dobrado na superfície do furo, pois mostra uma porção de material da peça, ferro fundido, engastada entre os grãos de diamante.

Este fato indica que o fluido de corte não está sendo fornecido à zona de corte com fluxo e quantidade suficiente para a retirada dos cavacos produzidos ou que o fluido não está sendo filtrado adequadamente, permitindo que cavacos retornem junto com o fluido para a região de remoção de material. Esse material, devido à pressão da ferramenta sobre a superfície do furo, pode ser soldado à superfície do furo brunido.

As figuras 11.18b e 11.18d ilustram a ocorrência da remoção da grafita lamelar e o posterior arraste de material que preenche o vazio deixado pela grafita removida. A figura 11.18a mostra a seção longitudinal do furo alargado que não apresenta defeitos como crateras e deformação do material.

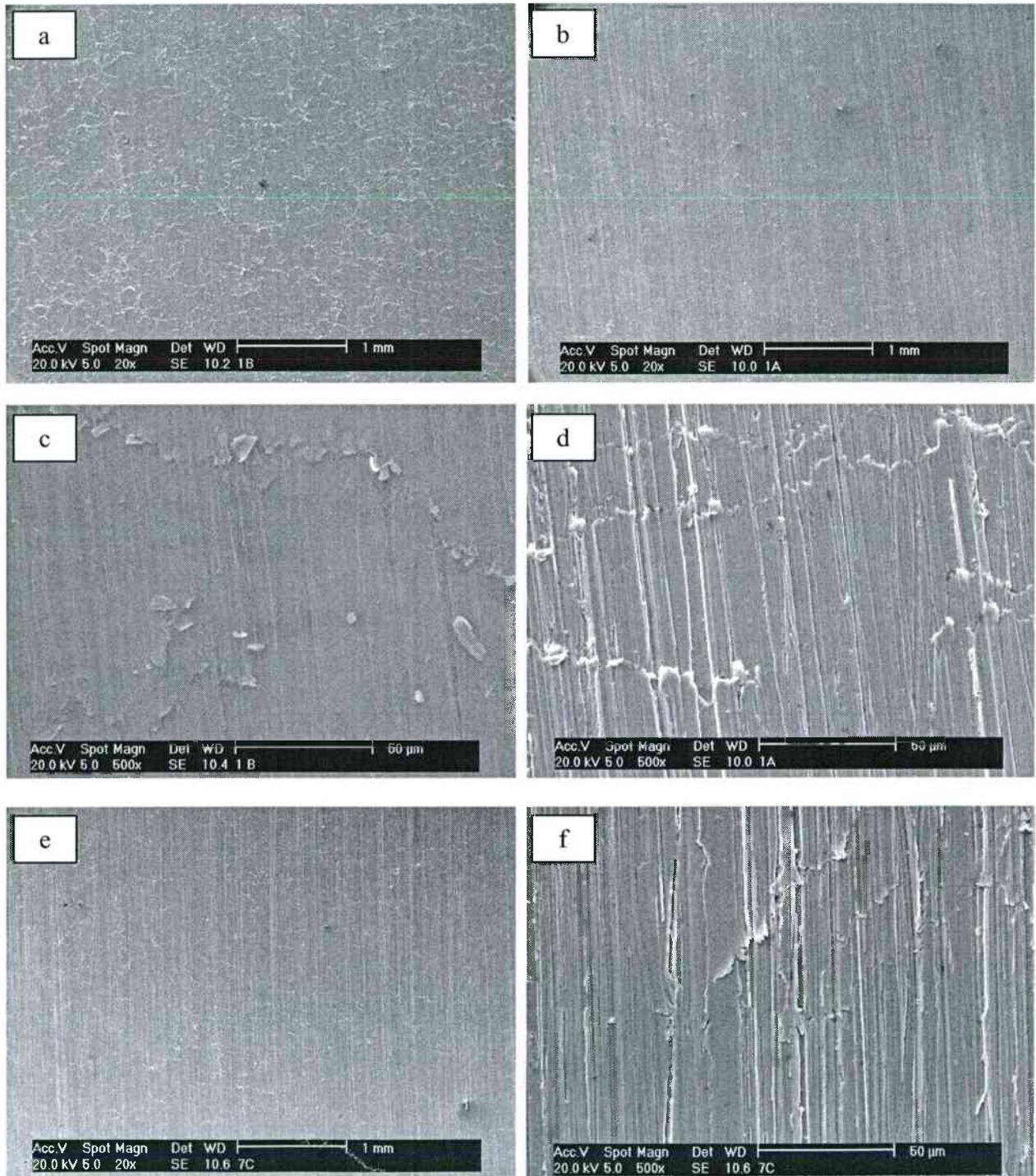


Figura 11.16 – Superfícies produzidas pelo brunimento de acabamento e superfícies escovadas

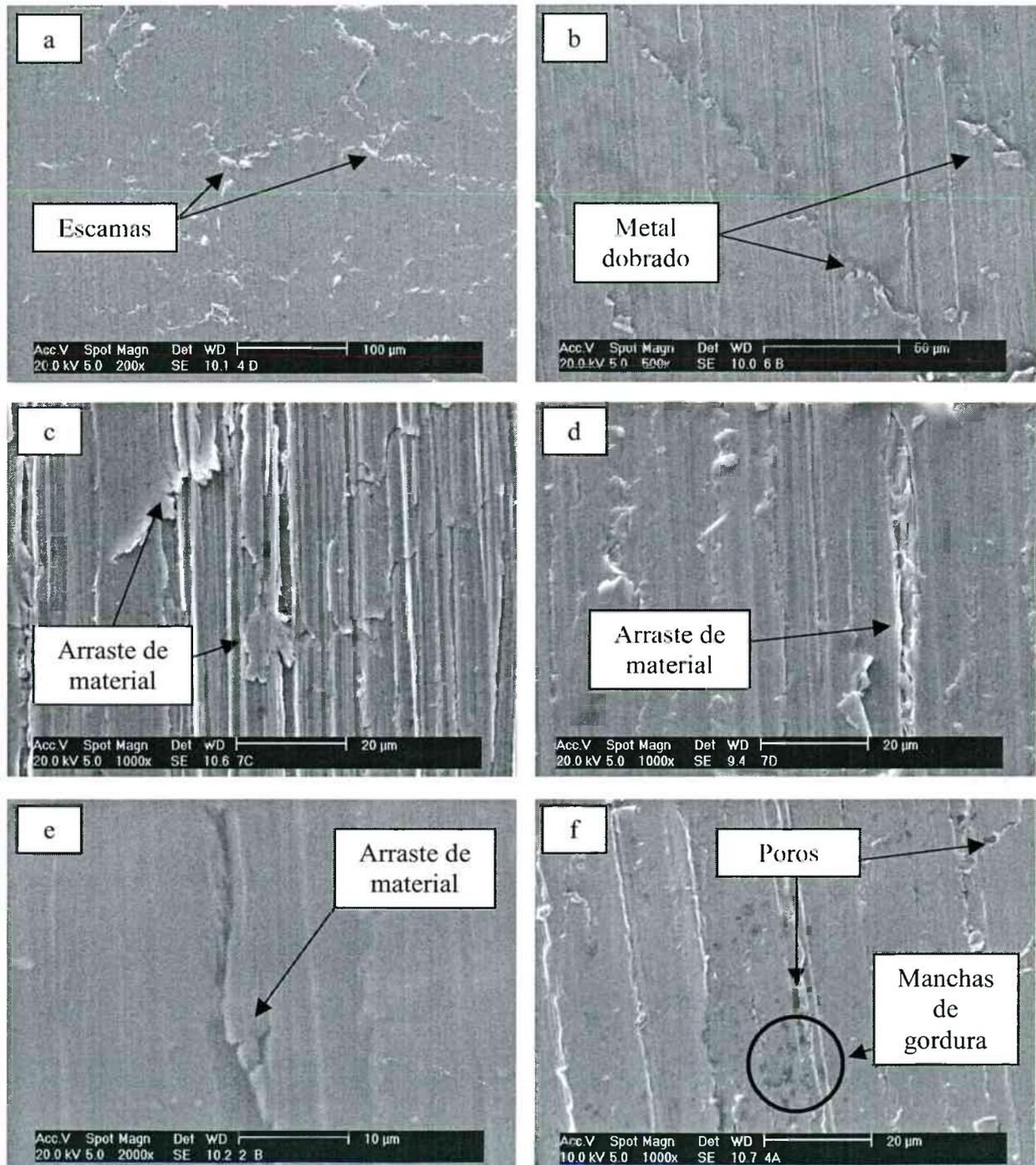


Figura 11.17 – Superfícies produzidas pelo brunimento de acabamento e superfícies escovadas

11.6 Integridade das superfícies geradas pelo brunimento de passe único

De acordo com o exposto no capítulo 7, segundo WICK et al., 1985, um mínimo de dano é produzido nas superfícies de peças brunidas, pois os gumes dos grãos abrasivos são muito pequenos e o corte de milhares de partículas ao mesmo tempo, com uma baixa velocidade, produz níveis de tensão e calor muito baixos.

As superfícies brunidas com a ferramenta de grãos D150, desbaste, sem o dressamento da camada abrasiva, sofreram os maiores danos, como pode ser verificado nas figuras 11.6, 11.7, 11.18d e 11.18e. Na figura 11.18d pode-se perceber a intensa deformação imposta ao material onde os veios de cementita, linhas brancas na figura, foram orientadas em sentidos opostos após a passagem do grão de diamante (representado por um triângulo).

Além disso, o brunimento com ferramenta sem condicionamento dos grãos de diamante arrancou, além da grafita presente no material da peça, porções de material, como ilustrado na figura 11.18e.

Entretanto, a ferramenta de desbaste com a camada abrasiva condicionada também provocou defeitos na superfície do furo, como o arrancamento de material, exemplificado na figura 11.9e. A grande deformação verificada nesta etapa, com formação de escamas, provavelmente afetou as camadas abaixo da superfície.

A figura 11.19 apresenta a seção transversal de uma peça brunida com a ferramenta de acabamento, grãos de diamante D30. Mesmo para a operação de acabamento pode-se verificar a deformação do material abaixo da superfície, onde os veios de cementita, constituinte da perlita, foram comprimidos e orientados no sentido da ação de corte da ferramenta.

Essa deformação se estende até, aproximadamente, 10 μm abaixo da superfície. Há, ainda, uma porção de material praticamente solta na estrutura, ancorada apenas pelo material deformado acima dela. A descolagem dessa porção de material provocaria a formação de uma cratera na superfície.

Não é possível determinar, porém, se a deformação verificada na superfície brunida foi provocada apenas pela ferramenta de acabamento. É provável que essa deformação tenha sido, em parte, provocada pelas outras ferramentas, alargador, brunidor de desbaste ou brunidor de semi-acabamento.

Uma verificação mais detalhada, com um maior número de amostra, se faz necessária para determinar a profundidade do dano causado no material em cada etapa do processo.

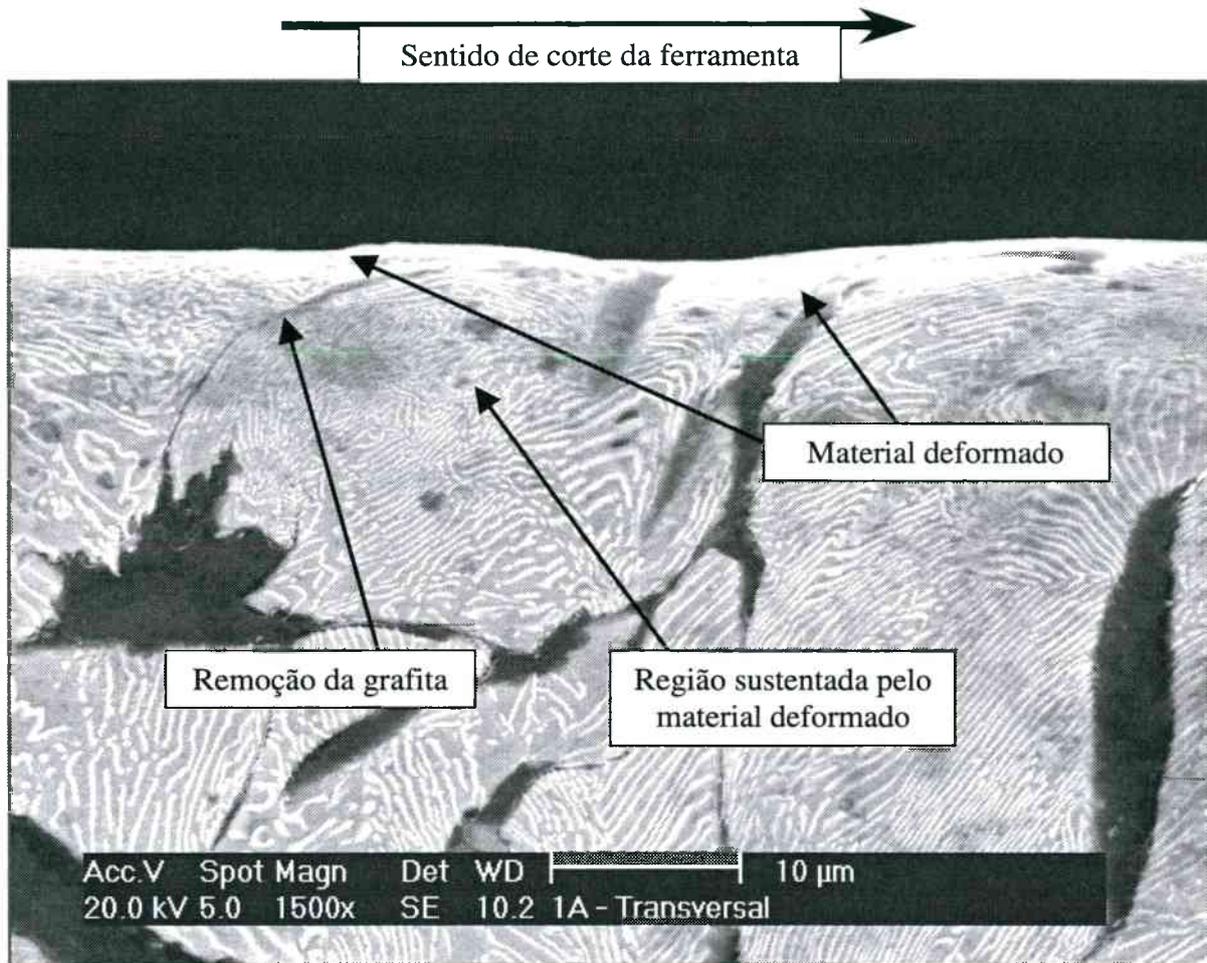


Figura 11.19 – Deformação sub-superficial do material causado pelo processo de brunimento

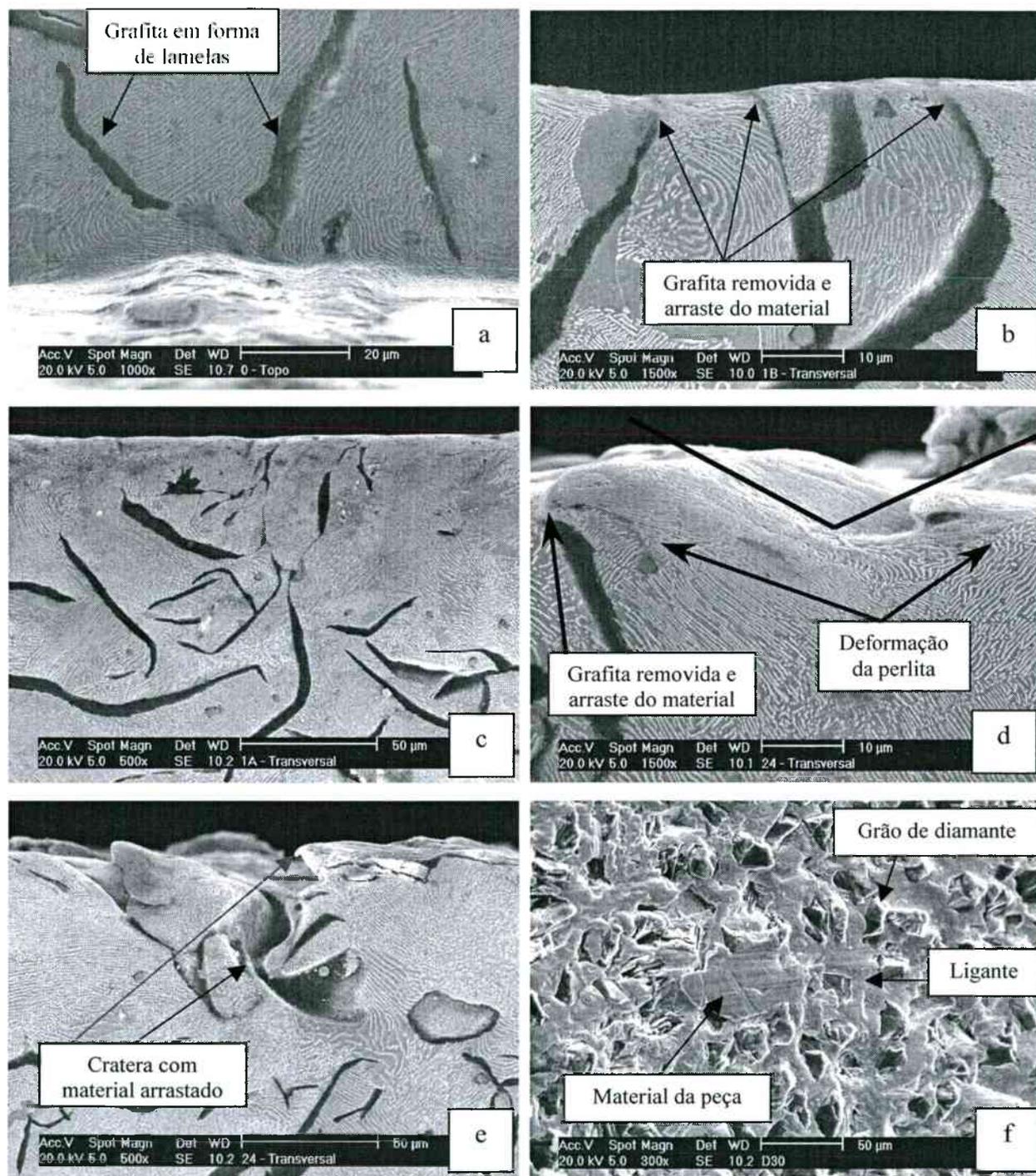


Figura 11.18 – Aspectos da textura e integridade das superfícies brunidas

CAPÍTULO 12

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

12.1 Conclusões

Uma quantidade cada vez maior dos componentes técnicos produzidos atualmente exige um melhor desempenho, maior durabilidade e confiabilidade, o que significa fabricá-los com técnicas e tecnologias mais sofisticadas. Muitos desses componentes, aplicados na indústria de aviação, de motores e de automação, entre outras, necessitam de furos com um alto nível de precisão dimensional, retilineidade, circularidade e cilindridade, além de superfícies com texturas específicas e bem controladas.

Este trabalho permitiu comprovar que o brunimento de passe único com ferramentas tipo bucha diamantada mostra-se como uma boa opção, entre os processos de fabricação por usinagem, para a produção de componentes com tais características. Entretanto, para a obtenção dessas características são necessários cuidados especiais na escolha das variáveis de entrada do processo. O brunimento de passe único, apesar de bastante difundido e utilizado na indústria, tem a escolha dessas variáveis de entrada geralmente baseada apenas em conhecimentos e experiências práticas e que, deste modo, somente a partir de sucessivas interações o processo atinge os resultados desejados.

Para auxiliar na escolha das variáveis do processo, este trabalho traz como contribuição uma metodologia científica que permite obter os resultados desejados de forma rápida e sistematizada, diminuindo assim os custos de usinagem.

Além disso, foram obtidos os seguintes e importantes resultados em relação aos objetivos estabelecidos para o presente trabalho:

- O diâmetro do furo brunido é afetado pelo sobremetal da peça e pelo curso da ferramenta. Maiores quantidades de sobremetal resultam em furos com menor diâmetro devido, principalmente, à deformação elástica do material da peça. Cursos mais longos provocam furos com diâmetros maiores nas extremidades, resultantes do “chicoteamento” da ferramenta decorrente da força centrífuga que atua sobre esta e sua fixação e, também, devido à pequena área de apoio proporcionada pela peça à ferramenta;
- Os erros geométricos de circularidade e de cilindridade são influenciados, principalmente, pelo erro de cilindridade inicial do furo, pelo curso e pela velocidade periférica

da ferramenta. A utilização dessas variáveis quando em níveis mais altos resulta em maiores erros geométricos. O efeito prejudicial causado pelo curso mais longo e pela velocidade periférica mais elevada sobre a geometria do furo brunido deve-se ao “chicoteamento” da ferramenta. Erros de cilindridade iniciais maiores causam o desbalanceamento das forças de corte e uma penetração mais agressiva dos grãos de diamante na superfície da peça, devido à existência de uma maior quantidade de material a ser removido em um dos lados do furo;

- A textura da superfície do furo é afetada pela velocidade periférica, velocidade axial e erro de cilindridade inicial do furo. O aumento do número de grãos que passa por uma determinada área da superfície do furo, alcançado com maiores velocidades periféricas e menores velocidades axiais, diminui a rugosidade através da redução, ou remoção, dos picos formados pela rebarba levantada, devido à deformação plástica do material, durante a passagem dos grãos de diamante anteriores. A elevação do erro de cilindridade inicial ocasiona uma penetração mais agressiva dos grãos na superfície de um dos lados do furo produzindo, por isso, maiores rebarbas formadas pelo material deformado plasticamente. Essas rebarbas aparecem como picos na medição de rugosidade aumentando os valores dos parâmetros de rugosidade utilizados;

- O tamanho do grão de diamante e a operação de dressamento destes também influem nas características do furo brunido. O efeito destas variáveis está relacionado à agressividade com que os grãos penetram na superfície da peça. Esta penetração agressiva desestabiliza a operação, sendo que grãos sem dresser produzem furos com dimensão, geometria e textura da superfície inadequados ao uso. Pequenos erros geométricos não são corrigidos com grãos de tamanho grande enquanto que ferramentas que possuem grãos menores podem ser utilizadas com maiores velocidades periféricas;

- A otimização do processo de brunimento de ferro fundido cinzento GG30 com ferramentas tipo bucha diamantada e com os equipamentos utilizados neste trabalho é obtida através da seguinte combinação de variáveis de entrada: baixa velocidade periférica (16 m/min no desbaste, 16 a 20 m/min no semi-acabamento e 16 a 26 m/min no acabamento), pequeno curso (105 mm) e baixa velocidade axial da ferramenta (1,0 m/min), além de pequeno erro de cilindridade inicial ($< 8 \mu\text{m}$) e maior sobremetal do furo ($> 30 \mu\text{m}$ no desbaste);

- Através da comprovação estatística da otimização do processo de brunimento é possível afirmar que as ferramentas tipo bucha diamantada produzem furos com excelente repetibilidade no diâmetro e erros de cilindridade da ordem de $1 \mu\text{m}$ e rugosidade R_{max} próximas a $1,5 \mu\text{m}$, sendo esta última medida com sistema de apalpação mecânico;

- Quanto à textura da superfície do furo brunido pode-se afirmar que não foram observadas superfícies platafórmicas, de acordo com os motivos expostos no capítulo 11. Os parâmetros da família R_k descrevem a rugosidade das superfícies brunidas adequadamente, permitindo o acompanhamento e a análise das regiões de pico, de vale e central, produzidas por cada ferramenta separadamente. Além disso, defeitos na textura e danos na integridade da superfície foram encontrados. Os principais defeitos são a remoção da grafita, originando poros, arraste e re-soldagem de material sobre a superfície. O dano observado na integridade do material da superfície foi a deformação plástica na direção do movimento de corte, isto mesmo após a atuação da ferramenta de acabamento. A espessura da camada deformada é da ordem de $10\ \mu\text{m}$.

12.2 Sugestões para futuros trabalhos

A utilização de ferramentas tipo bucha diamantada no brunimento de passe único de ferro fundido cinzento GG30 pode resultar em furos com precisão dimensional e geométrica de $1\ \mu\text{m}$ e rugosidade R_{max} da superfície de $1,5\ \mu\text{m}$. Entretanto, algumas melhorias, como as descritas a seguir, podem ser implementadas e pesquisadas com o objetivo de obter características dimensionais, geométricas e de rugosidade ainda melhores:

- Utilização de ferramentas com dispositivos de fixação rígidos e dispositivos de fixação de peças do tipo pendular, descrito por ARUNACHALAN et al., 1997, MARVIN, 1998 e ilustrado na figura 5.14. Com esse sistema de fixação é eliminado o efeito de “chicoteamento”, decorrente das forças centrífugas, observado em rotações mais altas e o “tombamento” da ferramenta. Assim, podem ser utilizadas velocidades periféricas e axiais mais altas;

- Emprego de ferramentas com canais internos para passagem de fluido de corte. Esse tipo de ferramenta, descrita por EKE, 1994, pode melhorar consideravelmente a retirada dos cavacos produzidos da região de corte com reflexos diretos sobre o acabamento da superfície do furo. Entretanto o uso deste tipo de ferramenta requer dispositivos de fixação rígidos, como o sistema citado anteriormente;

- Utilização de ferramenta de acabamento com grãos de CBN as quais, segundo MILLER, 1996, e SOLAROLI, 1997, produzem um melhor acabamento da superfície e textura com menos defeitos dos observados para as ferramentas de diamante;

- Estudar a implementação do sistema descrito acima em centros de usinagem verticais visando eliminar a necessidade de máquinas especiais de brunimento do parque de máquinas-

ferramenta da fábrica e aumentar o controle sobre as variáveis de velocidade e curso com a utilização do comando numérico;

- Estudar a extensão dos danos causados na integridade da superfície para as etapas de brunimento de desbaste e semi-acabamento para o brunimento com ferramentas diamantadas e a etapa de acabamento para o brunimento com ferramentas de CBN, bem como para a operação de usinagem pré-brunimento.

CAPÍTULO 13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A BETTER WAY to tackle that problem bore. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry - Honing**, Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 29-31.
- ARUNACHALAM, S.; O'SULLIVAN, J. M. Superabrasive reaming – an innovative technique for bore finishing. **Industrial Diamond Review**, Berkshire, v. 3, p. 76-80, 1997.
- AUSCHNER, W. Fundamentals of superfinishing. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee : [S.I.], mai. 1997. 29 p.
- BATES, Charles. Heading to high-volume honing. **American Machinist**, [S.I.], p. 256-260, ago. 1998.
- BALINSKIJ, V. R. Surface defects of grey-iron castings after honing. **Liteinoe Proizvodstvo**, [S.I.], v. 5, p. 33, mai. 1991.
- BEYERER, J.; LEÓN, F. P. Detection of defects in groove textures of honed surfaces. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, London, v. 37, n. 3, p. 371-389, 1997.
- BOEHS, L. **Análise de superfícies usinadas**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia mecânica da UFSC. Florianópolis, 1992.
- BRM. **An observation of some common practices in cylinder boring, honing and wall finishing**. Brush Research Manufacturing Co., Los Angeles, 15 p., 1987.

- BRÜLÉ, R. A. **Um desenvolvimento teórico preliminar sobre o brunimento: forças de corte e erros intrínsecos ao brunimento.** São Carlos, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- BRUMGARD, J. Challenges of metalworking fluids in honing and superfinishing applications. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee : [s.n.], mai. 1997. 4 p.
- CARBURUNDUM. **Abrasivos de liga.** São Paulo, [199-]. Catálogo geral.
- CERTI. **Tolerâncias de forma e posição considerando a condição de máximo material.** Florianópolis, mai. 1994.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 576 p., 1990.
- CONNOR, T. Utilizing superabrasives for long tube honing. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994. 17p.
- CHRISTENSEN RODER. **Rebolos.** São Paulo, 1993. Catálogo.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Kenngrößen R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} , zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil, DIN 4776.** [S.I.], mai. 1990.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Measuring the surface roughness of workpieces, DIN 4775.** [S.I.], jun. 1982.
- EKE, D.; ZIMMERMANN, W. Development toward a perfect spool/bore fit. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994. 27 p.
- ELLIS, M. P. Honing. In: ASTME. **Tools Engineers Handbook.** 2. ed. New York : Mc Graw-Hill, 1959. cap. 38, p. 1-12.

ENGIS. **Engis single-pass superabrasive bore finishing systems.** Wheeling, 1994. Catalogue.

FINISH machining of bore now a simpler operation. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry - Honing**, Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 38-39.

FLORES, G. High frequency honing. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994a. 18 p.

_____. Honing of connecting rods. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994b. 15 p.

HAASIS, G. **Dornhonen.** Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, Nürtingen, 20 p., 1993.

HALE, I. Principles of superfinishing. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee : [s.i.], mai., 1997. 14 p.

INMETRO. **Guia para expressão da incerteza de medição.** Rio de Janeiro, ago. 1997.

JUCHEM, H. O. Honing with diamond and CBN abrasives. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry – Honing.** Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 2-11.

KING, T. G.; HOUGHTON, N. E. Describing distribution shape: R_k and central moment approaches compared. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, London, v. 35, n. 2, p. 247-252, 1995.

KLINK, U. Multi-stage honing of connecting rods. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry – Honing.** Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 15-19.

- KOELSCH, J. R.. Honing fluid performance. **Manufacturing Engineering**, [S.I.], p. 51-55, fev. 1994a.
- _____. Troubleshooting finish problems. **Manufacturing Engineering**, [S.I.], p. 53-55, set. 1994b.
- KOMANDURI, R.; LUCCA, D. A.; TANI, Y. Technological advances in fine abrasive processes. **Annals of the CIRP**, Bern, v. 46, n. 2, p. 565-580, 1997.
- KOPP, O. A new multi-spindle honing and step reaming machine. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry – Honing**. Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 32-36.
- _____. Automated honing of fuel injection nozzels. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry – Honing**. Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 12-14.
- _____. High-frequency honing for improved bore quality. **Industrial Diamond Review**, Berkshire, v. 3, p. 116-118, 1995.
- KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren – band 4: Schleifen, Honen und Läppen**. 4. Auflage. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1989.
- KREYSZIG, E. **Introductory Mathematical Statistics**. John Wiley & Sons Inc.; New York, 1970.
- LEE, J.; MALKIN, S. Experimental investigation of the bore honing process. **Transactions of the ASME**, [S.I.], v. 115, p. 406-414, nov. 1993.
- LIN, Y. T. Precision honing with in-process gaging and control - effects of honing force and temperature. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994. 11 p.

- LIVERTON, J. W.; MIDDLETON, R.; TAYLOR, N. S. Recent developments in CNC honing machines. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, 1994. 11 p.
- MALBURG, M. C.; RAJA, J. Characterization of surface texture generated by plateau honing process. *Annals of the CIRP*, Bern, v. 42, n. 1, p. 637-640, 1993.
- MARVIN, R. **Achieving maximum effectiveness with single pass superabrasive bore finishing**. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1994.
- _____. **Advancements in single pass superabrasive bore finishing**. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1998.
- _____. **The advance precision finishing of ceramic components utilizing single pass superabrasive processing**. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1997.
- MESQUITA, N. G. M. **Determinação dos parâmetros da fórmula expandida de Taylor**. Florianópolis, 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- MICHALSKI, J.; PAWLUS, P. Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces. *Wear*, [S.I.], v. 161, p. 135-143, 1993.
- MICHALSKI, J.; PAWLUS, P. Description of honed cylinders surface topography. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, [S.I.], v. 34, n. 2, p. 199-210, 1994.
- MICHALSKI, J.; PAWLUS, P. Effects of metallurgical structure and cylinder surface topography on the wear of piston ring-cylinder assemblies under artificially increased dustiness conditions. *Wear*, [S.I.], v. 179, p. 109-115, 1994.
- MILLER, J. Super-abrasive reaming of bores in cast iron. *Industrial Diamond Review*, Berkshire, v. 2, p. 52-57, 1996.

- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 3. ed. New York : John Wiley & Sons Inc., 1991.
- MUMMERY, L. **Surface texture Analysis – The handbook**. 1. ed. Mühlhausen, WG : Thyssen Hommelwerk GmbH, 1992.
- NAGEL. **Bedienungsanleitung für Precidorhonwerkzeuge -Dornhonwerkzeug**. Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, Nürtingen, ago. 1992. p. 4.
- _____. **Elemente des Honens**. Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, Nürtingen, nov. 1996. p. 6.
- _____. **Precidorhonen**. Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, Nürtingen, dez. 1994. p. 8.
- NOAKER, P. M. The well-honed competitive edge. **Manufacturing Engineering**, [S.I.], págs. 53-59, sep. 1995.
- OPTICAL probe for Perthometer non-contact profile acquisition. Feinprüf Perthen GmbH, Goettingen, 1989.
- PAULL, D.; DAWSON, D.; McCONNEL, B. et al. Honing. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**. vol. 3, 8. ed. Ohio : American Society for Metals, 1967. p. 288-298.
- PAWLUS, P. A study of the dependence of the functional properties of the cylinder liner surface layer on the operating conditions. **Proc. Instn. Mech. Engrs.**, [S.I.], v. 210, p. 17-27, 1996.
- PAWLUS, P. A study of the functional properties of hone cylinders surface during running-in. **Wear**, [S.I.], v. 176, p. 247-254, 1994.

- PENCE, D. Laser honing. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee : [S.I.], mai., 1997. 13 p.
- PERES, R. M. **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo do tipo "Precidor"**. Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANNAREDDY, H.; RAJA, J.; CHEN, K. Characterization of surface texture generated by multi-process manufacture. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, [S.I.], v. 38, n. 5, p. 529-536, 1998.
- SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. Florianópolis, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SOLAROLI, L.; COLLINGS, T. Troubleshooting honing processes with a scanning electron microscope and reflected light microscopes. In: UNDERSTANDING the basics of honing & superfinishing, Nashville, Tennessee, : [S.I.], mai. 1997. 22 p.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 1. ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1992.
- SUNNEN. **Multi-spindle bore sizing machine**. St. Louis, 1993. Catalogue.
- TABENKIN, A. Surface measurements technology and standards. UNDERSTANDING the basics of honing & superfmishing, Nashville, Tennessee : [s.n.], mai. 1997. 18 p.
- WESTKAMPER, E.; KAPPMAYER, G. The use of ultrasonic technology in single stroke honing. In: INTERNATIONAL HONING clinic, Novi, Michigan : SME, abr. 1994. 18 p.
- WICK, C.; VEILLEUX, R. F. Honing. In: SME. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. Dearborn : SME, 1985. p. 104-115.

WINTER. **Rebolos**. São Paulo, [199-]. Catálogo.

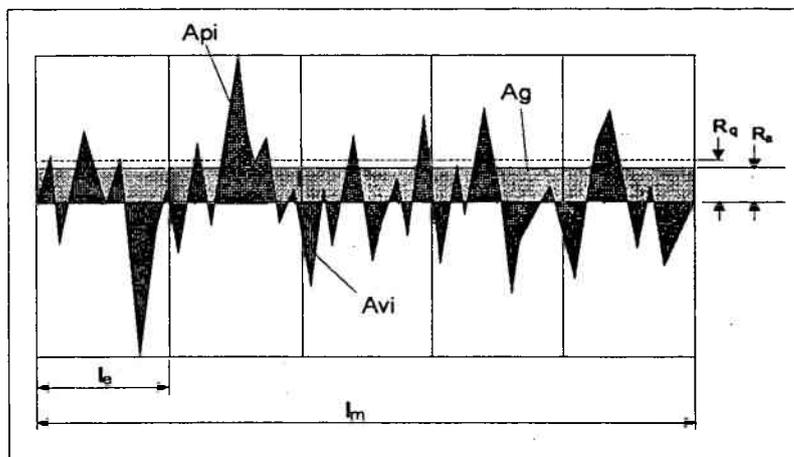
WOLF, M.; DREHER, R. Machining of aluminium engine parts for the Porsche 928. In: DE BEERS. **Ultrahard Materials in Industry - Honing**, Ascot, Berkshire : De Beers Industrial Diamond Division, jul. 1986. p. 20-23.

Definição dos parâmetros de rugosidade mais utilizados no processo de brunimento

A definição dos parâmetros de rugosidade apresentados neste anexo estão descritas na referência MUMMERY, 1992.

- R_a - Desvio médio aritmético de rugosidade ou valor médio de rugosidade.

É a média aritmética do valor absoluto das ordenadas "y" do perfil de rugosidade dentro do percurso de medição l_m , tomando como referência a linha média. Isto é equivalente a altura de um retângulo de comprimento igual ao percurso de medição l_m e de área igual a soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média.



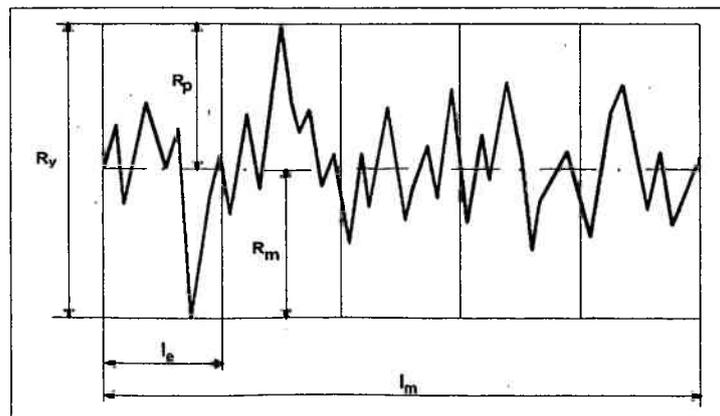
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_0^n |y_i|$$

ou

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx$$

- R_y - Altura máxima do perfil

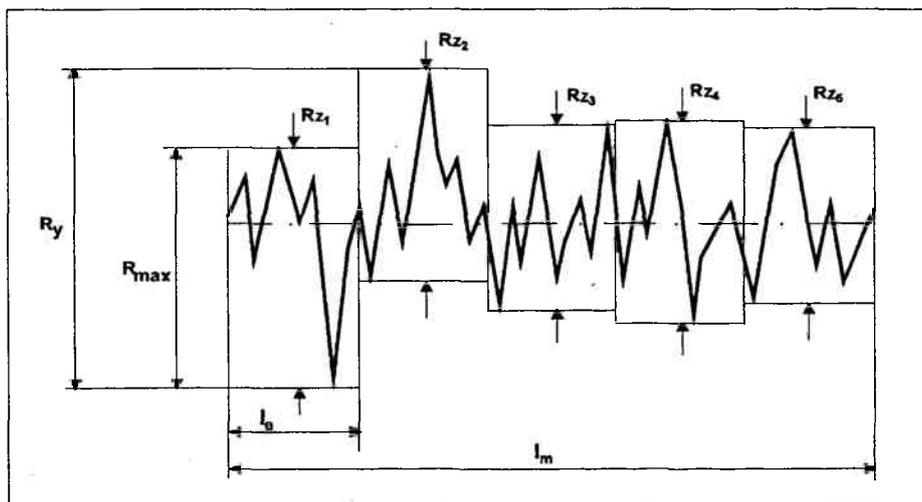
Distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do percurso de medição (figura 6). $R_y = R_p + R_m$. Antigamente era chamado de Profundidade de Rugosidade R_t .



Definição dos parâmetros de rugosidade mais utilizados no processo de brunimento

- R_{Zi} - Profundidade isolada de rugosidade.

Distância entre duas paralelas à linha média, as quais tocam os pontos máximo e mínimo dentro dos comprimentos de amostragem, figura abaixo. É igual à soma das ordenadas dos dois pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média, existentes dentro do trecho correspondente a cada comprimento de amostragem. Na representação gráfica do perfil, este valor corresponde à distância entre os pontos de máximo e mínimo do perfil, dentro do percurso correspondente a cada comprimento de amostragem l_e .



- R_{ZDIN} - Profundidade média de rugosidade.

É a média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade (Z_i) dos cinco comprimentos de amostragem (l_e), contidos no percurso de medição (l_m).

$$R_{ZDIN} = \frac{1}{5} \sum (R_{Z1} + R_{Z2} + R_{Z3} + R_{Z4} + R_{Z5}) \quad (3)$$

- R_{max} - Profundidade máxima individual de rugosidade.

É a maior das cinco profundidades isoladas de rugosidade (Z_i). Na figura acima R_{max} corresponde a Z_1 .

- Família de parâmetros R_k (DIN 4776)

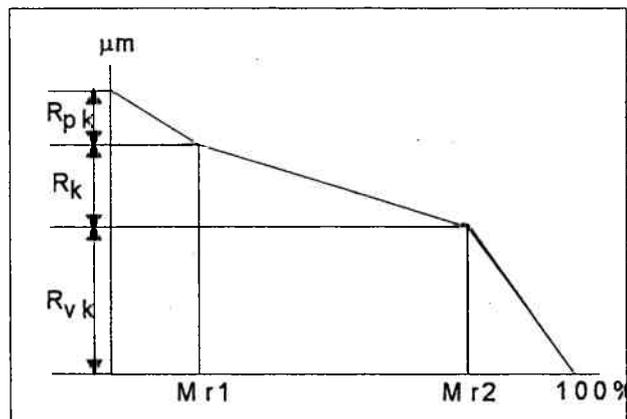
Para calcular os parâmetros da família R_k , a curva de taxa de material, t_p , é aproximada por linhas retas que a dividem em três partes: os picos, os vales e a região central da superfície, figura abaixo.

Definição dos parâmetros de rugosidade mais utilizados no processo de brunimento

A família R_k é formada pelos parâmetros:

- R_k – profundidade da rugosidade central;
- R_{pk} – altura de pico reduzida;
- R_{vk} – profundidade de vale reduzida;
- M_{r1} – taxa de material nos picos;
- M_{r2} – taxa de material nos vales;
- V_o – volume de óleo armazenado.

$$V_o = \frac{R_{vk} (100 - M_{r2})}{200}$$



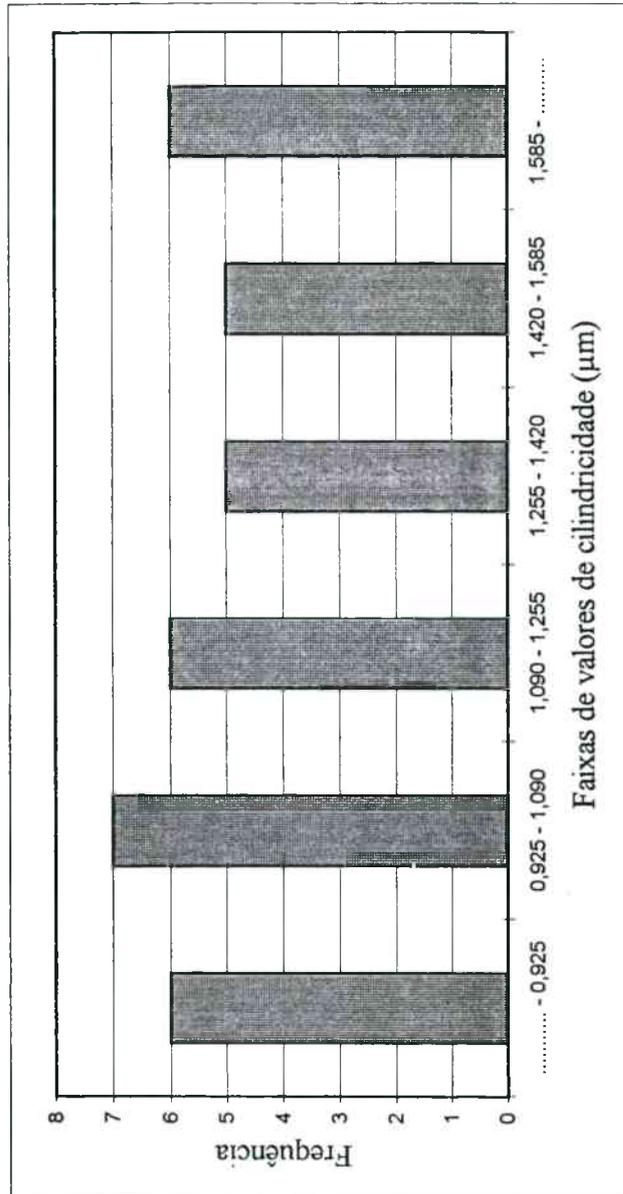
Grandes valores de R_{vk} e pequenos valores de R_{pk} indicam que a superfície medida apresenta picos pequenos, baixos, e profundos vales, características de superfícies platafórmicas.

Cilindricidade (µm) - Qui-quadrado

0,65	0,84	0,95	0,95	1,03	1,11	1,22	1,37	1,45	1,53	1,79	1,91
0,69	0,92	0,95	0,99	1,11	1,11	1,26	1,37	1,49	1,58	1,83	2,02
0,84	0,92	0,95	1,03	1,11	1,18	1,34	1,41	1,53	1,75	1,91	

Média (m): 1,260
 Desvio Padrão (s): 0,368
 Variância (s²): 0,135
 Maior Valor (x_{max}): 2,02
 Menor Valor (x_{min}): 0,65
 N° medições: 35

.....	- 0,925	6
	0,925 - 1,090	7
	1,090 - 1,255	6
	1,255 - 1,420	5
	1,420 - 1,585	5
	1,585 -	6
		35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ ²
1	0,925	-0,91	0,181	6,35	6	0,02
2	1,090	-0,46	0,322	4,93	7	0,87
3	1,255	-0,01	0,495	6,04	6	0,00
4	1,420	0,44	0,668	6,08	5	0,19
5	1,585	0,88	0,812	5,01	5	0,00
6	.....	.....	1,000	6,59	6	0,05
				35	35	1,13

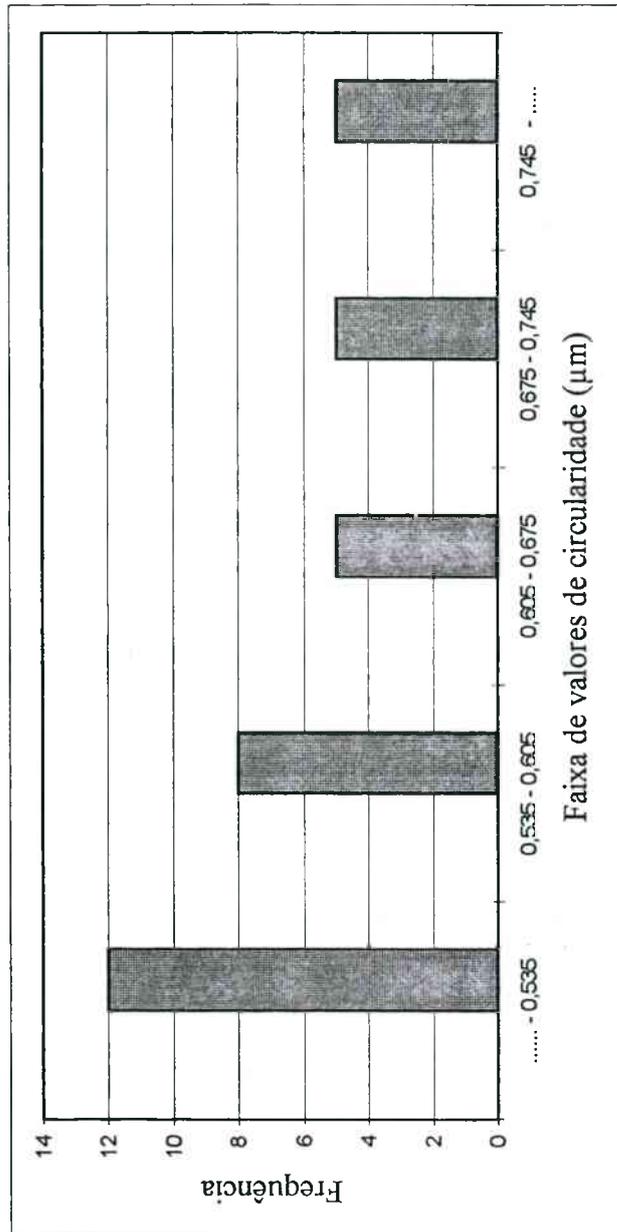
v = k - r - 1
 k = 6
 r = 2
 v = 3
 a = 0,05
 χ²_{crit} = 7,81
 χ²_{calc} < χ²_{crit}

Circularidade (µm) - Qui-quadrado

0,45	0,50	0,52	0,53	0,54	0,55	0,57	0,63	0,67	0,73	0,75	0,88
0,48	0,51	0,52	0,53	0,54	0,56	0,58	0,64	0,68	0,74	0,75	0,88
0,49	0,52	0,53	0,53	0,55	0,57	0,61	0,67	0,71	0,74	0,76	

Média (m): 0,6097
 Desvio Padrão (s): 0,1129
 Variância (s²): 0,0127
 Maior Valor (x_{max}): 0,88
 Menor Valor (x_{min}): 0,45
 N° medições: 35

..... - 0,535	12
0,535 - 0,605	8
0,605 - 0,675	5
0,675 - 0,745	5
0,745 -	5
	35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ ²
1	0,535	-0,66	0,254	8,89	12	1,09
2	0,605	-0,04	0,483	8,03	8	0,00
3	0,675	0,58	0,719	8,23	5	1,27
4	0,745	1,20	0,885	5,82	5	0,11
5	.....	.....	1,000	4,04	5	0,23
				35	35	2,70

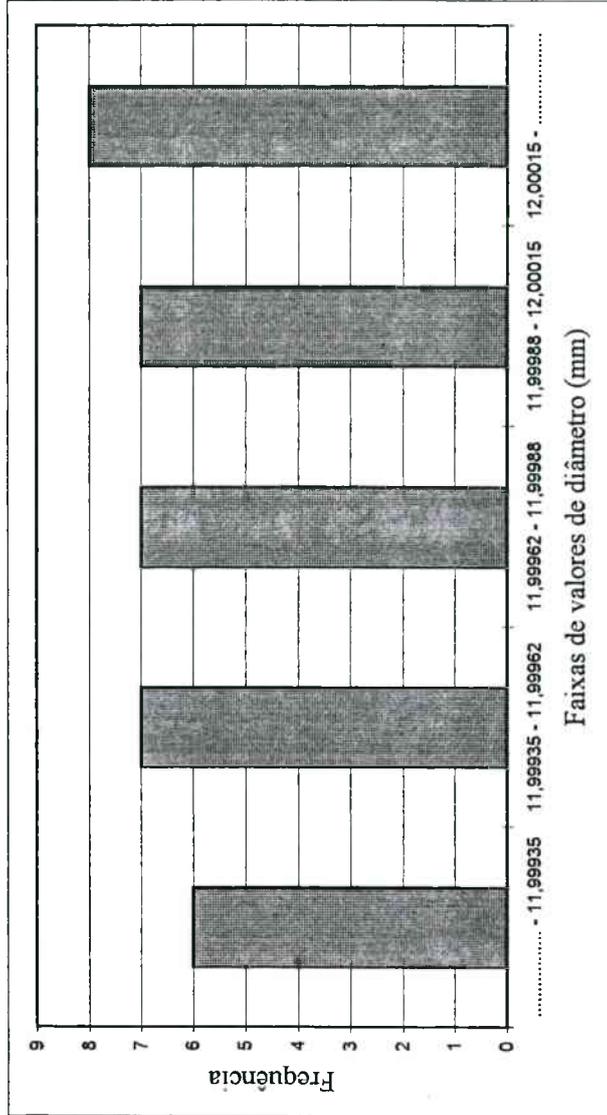
v = k - r - 1
 k = 5
 r = 2
 v = 2
 α = 0,05
 χ²_{crit} = 5,99
 χ²_{calc} < χ²_{crit}

Diâmetro (mm) - Qui-quadrado

11,9979	11,9989	11,9994	11,9995	11,9996	11,9998
11,9981	11,9993	11,9994	11,9995	11,9997	11,9998
11,9983	11,9993	11,9995	11,9996	11,9998	11,9998
11,9998	11,9999	12,0000	12,0002	12,0002	12,0005
11,9998	11,9999	12,0001	12,0002	12,0003	12,0005
11,9999	12,0000	12,0001	12,0002	12,0003	12,0003

Média (m): 11,9997
 Desvio Padrão (s): 0,00061
 Variância (s²): 3,763E-07
 Maior Valor (x_{max}): 12,0005
 Menor Valor (x_{min}): 11,9979
 N° medições: 35

..... - 11,99935	6
11,99935 - 11,99962	7
11,99962 - 11,99988	7
11,99988 - 12,00015	7
12,00015 -	8
	35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ^2
1	11,99935	-0,54	0,29451	10,31	6	1,80
2	11,99962	-0,10	0,46012	5,80	7	0,25
3	11,99988	0,32	0,62691	5,84	7	0,23
4	12,00015	0,76	0,77751	5,27	7	0,57
5	.....	.....	1,0000	7,79	8	0,01
				35	35	2,85

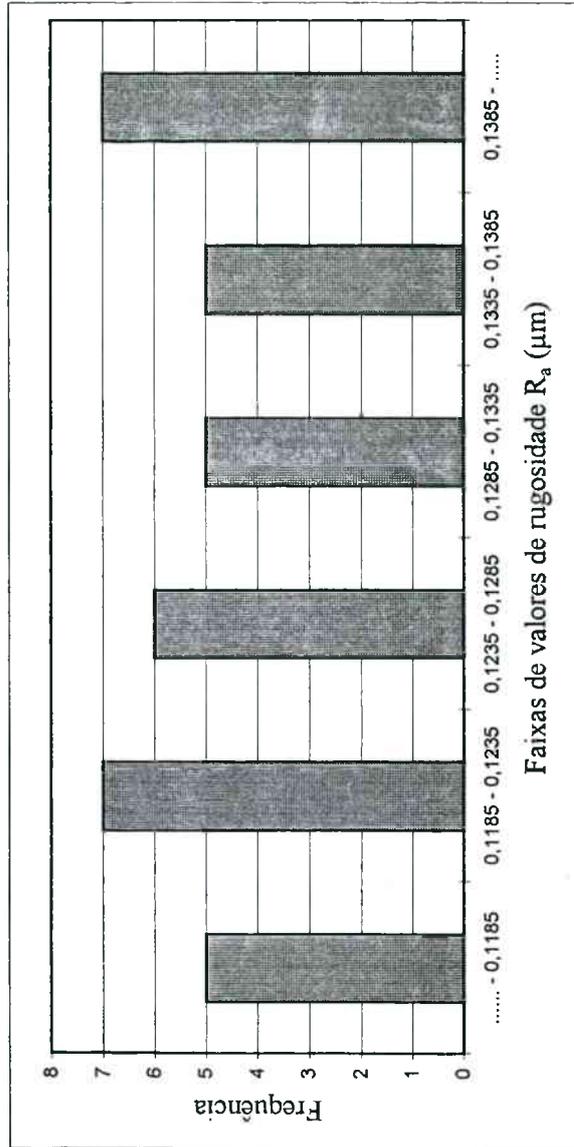
$v = k - r - 1$
 $k = 5$
 $r = 2$
 $v = 2$
 $\alpha = 0,05$
 $\chi^2_{crit} = 5,99$
 $\chi^2_{calc} < \chi^2_{crit}$

Rugosidade R_a (μm) - Qui-quadrado

0,096	0,116	0,120	0,122	0,125	0,127	0,129	0,129	0,136	0,138	0,149	0,150
0,112	0,118	0,121	0,123	0,125	0,128	0,129	0,133	0,137	0,140	0,149	0,165
0,112	0,119	0,121	0,123	0,126	0,128	0,129	0,134	0,137	0,143	0,150	

Média (m): 0,1295
 Desvio Padrão (s): 0,0133
 Variância (s^2): 0,0002
 Maior Valor (x_{max}): 0,165
 Menor Valor (x_{min}): 0,096
 N° medições: 35

..... - 0,1185	5
0,1185 - 0,1235	7
0,1235 - 0,1285	6
0,1285 - 0,1335	5
0,1335 - 0,1385	5
0,1385 -	7
	35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ^2
1	0,1185	-0,83	0,2045	7,16	5	0,65
2	0,1235	-0,45	0,3265	4,27	7	1,75
3	0,1285	-0,07	0,4707	5,05	6	0,18
4	0,1335	0,30	0,6188	5,19	5	0,01
5	0,1385	0,68	0,7512	4,63	5	0,03
6	.....	.....	1,0000	8,71	7	0,33
				35	35	2,95

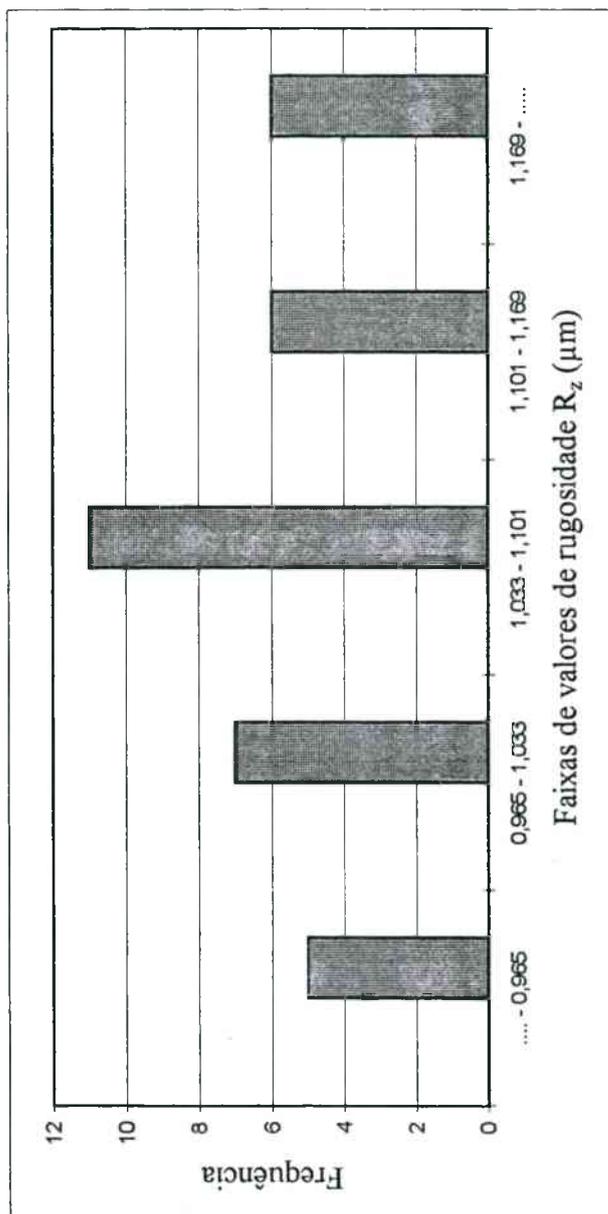
$v = k - r - 1$
 $k = 6$
 $r = 2$
 $v = 3$
 $\alpha = 0,05$
 $\chi^2_{\text{crit}} = 7,81$
 $\chi^2_{\text{calc}} < \chi^2_{\text{crit}}$

Rugosidade R_z (μm) - Qui-quadrado

0,879	0,953	0,977	0,996	1,034	1,056	1,078	1,091	1,122	1,161	1,207	1,284
0,887	0,960	0,979	1,018	1,042	1,066	1,083	1,101	1,136	1,163	1,234	1,291
0,936	0,970	0,993	1,032	1,052	1,077	1,085	1,115	1,149	1,181	1,283	

Média (m): 1,0763
 Desvio Padrão (s): 0,1071
 Variância (s^2): 0,0115
 Maior Valor (x_{max}): 1,291
 Menor Valor (x_{min}): 0,879
 N° medições: 35

..... - 0,965	5
0,965 - 1,033	7
1,033 - 1,101	11
1,101 - 1,169	6
1,169 -	6
	35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ^2
1	0,965	-1,04	0,1493	5,23	5	0,01
2	1,033	-0,40	0,3430	6,78	7	0,01
3	1,101	0,23	0,5913	8,69	11	0,61
4	1,169	0,87	0,8068	7,54	6	0,31
5	.....	.....	1,0000	6,76	6	0,09
				35	35	1,03

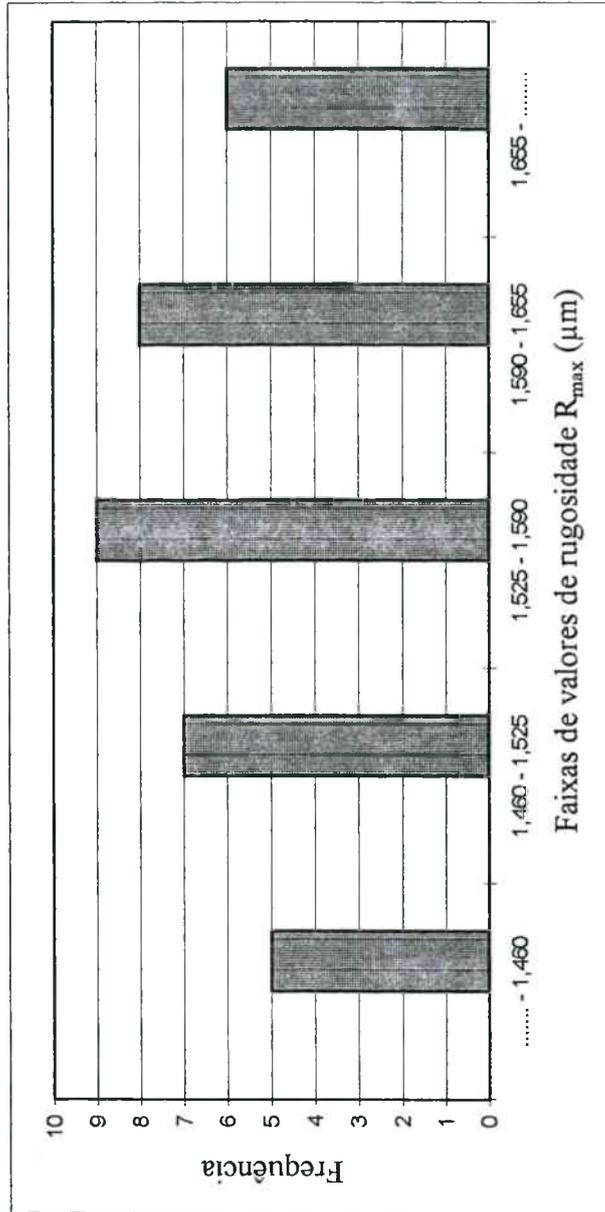
$v = k - r - 1$
 $k = 5$
 $r = 2$
 $v = 2$
 $\alpha = 0,05$
 $\chi^2_{\text{crit}} = 5,99$
 $\chi^2_{\text{calc}} < \chi^2_{\text{crit}}$

Rugosidade R_{max} (µm) - Qui-quadrado

1,424	1,449	1,473	1,517	1,529	1,559	1,576	1,593	1,601	1,623	1,701	1,886
1,431	1,459	1,481	1,524	1,540	1,565	1,588	1,595	1,601	1,632	1,717	2,036
1,441	1,464	1,516	1,524	1,545	1,566	1,588	1,598	1,609	1,670	1,839	

Média (m): 1,5844
 Desvio Padrão (s): 0,1294
 Variância (s²): 0,0168
 Maior Valor (x_{max}): 2,036
 Menor Valor (x_{min}): 1,424
 N° medições: 35

..... - 1,460	5
1,460 - 1,525	7
1,525 - 1,590	9
1,590 - 1,655	8
1,655 -	6
	35



k	x	(x-m)/s	F[(x-m)/s]	E	B	χ ²
1	1,460	-0,96	0,1682	5,89	5	0,13
2	1,525	-0,46	0,3230	5,42	7	0,46
3	1,590	0,04	0,5171	6,79	9	0,72
4	1,655	0,55	0,7071	6,65	8	0,27
5	.....	.....	1,0000	10,25	6	1,76
				35	35	3,35

v = k - r - 1
 k = 5
 r = 2
 v = 2
 α = 0,05
 χ²_{crit} = 5,99
 χ²_{calc} < χ²_{crit}



PLANILHA PARA DETERMINAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

DQ-158	REVISÃO: 002
DATA: 17/04/97	FOLHA: 01/01
F:\QAS\DQ\151-200\DQ-158\DQ-158.xls	

Serviço n°:	Sistema de Medição ou Medida Materializada	PC	Revisão	Data	Sigla executor	Rubr. executor	Rubrica Gerente
	CARCAÇAS DE VÁLVULAS (DIÂM. 12mm)			01/07/98	ALO		
SÍMBOLO	COMPONENTES DE INCERTEZA	VALOR +/- [mm]	DISTR. DE PROBAB.	DIVISOR	C_i	U_i [mm]	V_i ou V_{eff}
U_{CMM}	Im da CMM	0,00100	Normal	2,0000	1	0,00050	50
$U_{est. CMM}$	Estabilidade da CMM no Tempo	*****	*****	*****	*****	*****	*****
U_{ref}	Im do Anel de Referência	0,00020	Normal	2,0000	1	0,00010	50
$U_{est. fix}$	Estabilidade da Fixação	0,00050	Retangular	1,7321	1	0,00029	Infinito
$U_{dif. T}$	Dif. de Temp. entre o Anel a Cal. e o de Ref.	0,00002	Retangular	1,7321	1	0,00001	Infinito
U_{corr}	Im da Correção da CMM pelo Anel Referência	0,00030	Retangular	1,7321	1	0,00017	Infinito
U_A	Incerteza Padrão do Tipo A	0,00029	Normal	1,0000	1	0,00029	2
U_c	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,0007	44
U_{95}	INCERTEZA EXPANDIDA (aprox. 95%)		k = 2,06			0,0014	

Observações: Diâmetro Nominal do Anel Padrão: 10 mm.

A variação da temperatura ambiente durante a calibração foi de +/- 0,3 °C

*****: Fonte desprezível



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°:

Instrumento: Máquina de Medir Erro de Forma Código: CQ-POI-083
 Faixa de indicação: 0-1000 μm Resolução do instrumento: 0,01 μm

Padrão:	Padrão de circularidade	Código: CQ-4736
Valor nominal:	11,4 μm	Incerteza do padrão: 0,29 μm

Incerteza do tipo A

		Medidas														
1	11,44	4	11,48	7	11,37	10	11,37	13	16	19						
2	11,48	5	11,44	8	11,44	11		14	17	20						
3	11,44	6	11,37	9	11,44	12		15	18	21						
Média	11,43	Erro máximo	0,08	σ	N° medições	10	0,013	9	Graus de liberdade	9	Normal	Divisor	1			
												U _A = σ/\sqrt{n}	0,013	9	Normal	1

Incertezas do tipo B

Simb.	Tipo de Incerteza	Valor da incerteza	Distribuição	Divisor	Graus de liberdade
U _{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,29	Normal	2	∞
U _{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,45	∞

Sim-bolo	Componentes de incerteza	Incerteza Padronizada	Distribuição Probabilidade	Divisor	Incerteza U _i μm	v _i v _{eff}
U _A	Incerteza Padrão do Tipo A	0,013	Normal	1,0000	0,013	9
U _{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,29	Normal	2,0000	0,145	∞
U _{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,4500	0,004	∞
U _C	INCERTEZA COMBINADA				0,15	124947
U ₉₅	INCERTEZA EXPANDIDA (95%)		NORMAL	2	0,29	

Observações:

Disposição: Ver carimbo
 Analista da Qualidade:

Aprovação:

Data:

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO **LASUS**

Instrumento: Rugosímetro	Código: S8-P	Resolução do instrumento: 0,01 μm	
Faixa de indicação: 0-1000 μm			
Padrão: Padrão de rugosidade R_a	Parâmetro de rugosidade: R_a		
Valor nominal: 0,45 μm	Incerteza do padrão: 0,0225 μm		

Medidas											
1	0,46	4	0,47	7	0,45	10	0,45	13	16	19	
2	0,45	5	0,46	8	0,46	11	0,44	14	17	20	
3	0,47	6	0,45	9	0,43	12	0,45	15	18	21	
Média		Erro máximo		σ	N° medições	$U_A = \sigma/n^{1/2}$					Divisor
0,45		0,02		0,012	12	0,003					Normal
											11
											Normal

Incertezas do tipo B					
Simb.	Tipo de Incerteza	Valor da incerteza	Tipo de distribuição	Divisor	Graus de liberdade
U_{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,0225	Normal	2	∞
U_{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,45	∞

Componentes de incerteza					
Sim-bolo	Incerteza Padronizada	Distribuição Probabilidade	Divisor	Incerteza U_i μm	ν_i ν_{eff}
U_A	0,003	Normal	1,0000	0,003	11
U_{ref}	0,0225	Normal	2,0000	0,011	∞
U_{res}	0,01	Triangular	2,4500	0,004	∞
U_C	INCERTEZA COMBINADA			0,01	2122
U_{95}	INCERTEZA EXPANDIDA (95%)	NORMAL		0,02	
		2			

Observações:

Disposição: _____

Analista da Qualidade: _____

Aprovação: _____ Data: _____

LASUS

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Instrumento: Rugosímetro Código: S8-P
 Faixa de indicação: 0-1000 μm Resolução do instrumento: 0,01 μm

Padrão:	Padrão de rugosidade R_z	Parâmetro de rugosidade: R_z
Valor nominal:	1,58 μm	Incerteza do padrão: 0,087 μm

Incerteza do tipo A												
Medidas												
1	1,57	4	1,72	7	1,64	10	1,73	13	16	19		
2	1,59	5	1,65	8	1,61	11	1,55	14	17	20		
3	1,66	6	1,51	9	1,63	12	1,73	15	18	21		
Média		Erro máximo		σ	Nº medições		$U_A = \sigma/n^{1/2}$	Graus de liberdade			Tipo de distribuição	Divisor
1,63		0,15		0,071	12		0,021	11			Normal	1

Incertezas do tipo B						
Simb.	Tipo de Incerteza	Valor da incerteza	Tipo de distribuição	Divisor	Graus de liberdade	
U_{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,087	Normal	2	∞	
U_{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,45	∞	

Sim-bolo	Componentes de incerteza	Incerteza Padronizada	Distribuição Probabilidade	Divisor	Incerteza U_i	ν_i
U_A	Incerteza Padrão do Tipo A	0,021	Normal	1,0000	0,021	ν_{eff}
U_{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,087	Normal	2,0000	0,044	11
U_{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,4500	0,004	∞
						∞
U_C	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL		0,05	334
U_{95}	INCERTEZA EXPANDIDA (95%)		2		0,10	

Observações:
 Disposição:
 Analista da Qualidade:

Aprovação: _____ Data: _____

LASUS

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Instrumento: Rugosímetro Código: S8-P
Faixa de indicação: 0-1000 μm Resolução do instrumento: 0,01 μm

Padrão:	Padrão de rugosidade R_{max}	Parâmetro de rugosidade: R_{max}
Valor nominal:	1,59 μm	Incerteza do padrão: 0,0795 μm

Incerteza do tipo A		Medidas											Tipo de distribuição		Divisor	
1	1,75	4	1,75	7	1,47	10	1,41	13	16	19						
2	1,43	5	1,41	8	1,71	11	1,42	14	17	20						
3	1,75	6	1,51	9	1,77	12	1,41	15	18	21						
Média	Erro máximo	σ	Nº medições	$U_A = \sigma/n^{1/2}$	Graus de liberdade						Tipo de distribuição		Divisor			
1,57	0,18	0,162	12	0,047	11	Normal							1			

Incertezas do tipo B		Valor da incerteza	Tipo de distribuição	Divisor	Graus de liberdade
Simb.	Tipo de Incerteza				
U_{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,0795	Normal	2	∞
U_{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,45	∞

Sim-bolo	Componentes de incerteza	Incerteza Padronizada	Distribuição Probabilidade	Divisor	Incerteza U_i μm	ν_i ν_{eff}
U_A	Incerteza Padrão do Tipo A	0,047	Normal	1,0000	0,047	11
U_{ref}	Incerteza do padrão de referência	0,0795	Normal	2,0000	0,040	∞
U_{res}	Incerteza associada à resolução	0,01	Triangular	2,4500	0,004	∞
U_C	INCERTEZA COMBINADA				0,06	33
U_{95}	INCERTEZA EXPANDIDA (95%)				0,13	

Observações:
Disposição:
Analista da Qualidade: Aprovação: Data:

Cálculo do tamanho da amostra

$\gamma = 0,05$

			Diâmetro (mm)	Circularidade (μm)	Cilindricidad e (μm)	Rugosidade R_a (μm)	Rugosidade R_{max} (μm)	Rugosidade R_z (μm)
IM			0,0014	0,15	0,45	0,02	0,13	0,09
Desvio Padrão, s			6,13E-04	0,1129	0,3679	0,0133	0,1294	0,1071
Variância, s^2			3,76E-07	1,27E-02	1,35E-01	1,77E-04	1,68E-02	1,15E-02
n	GL	t	2a	2a	2a	2a	2a	2a
2	1	12,706	0,0110	2,03	6,61	0,24	2,33	1,92
3	2	4,303	0,0030	0,56	1,83	0,07	0,64	0,53
4	3	3,182	0,0020	0,36	1,17	0,04	0,41	0,34
5	4	2,776	0,0015	0,28	0,91	0,03	0,32	0,27
6	5	2,571	0,0013	0,24	0,77	0,03	0,27	0,22
7	6	2,447	0,0011	0,21	0,68	0,02	0,24	0,20
8	7	2,365	0,0010	0,19	0,62	0,02	0,22	0,18
9	8	2,306	0,0009	0,17	0,57	0,02	0,20	0,16
10	9	2,262	0,0009	0,16	0,53	0,02	0,19	0,15
11	10	2,228	0,0008	0,15	0,49	0,02	0,17	0,14
12	11	2,201	0,0008	0,14	0,47	0,02	0,16	0,14
13	12	2,179	0,0007	0,14	0,44	0,02	0,16	0,13
14	13	2,160	0,0007	0,13	0,42	0,02	0,15	0,12
15	14	2,145	0,0007	0,12	0,41	0,01	0,14	0,12
16	15	2,131	0,0007	0,12	0,39	0,01	0,14	0,11
17	16	2,120	0,0006	0,12	0,38	0,01	0,13	0,11
18	17	2,110	0,0006	0,11	0,37	0,01	0,13	0,11
19	18	2,101	0,0006	0,11	0,35	0,01	0,12	0,10
20	19	2,093	0,0006	0,11	0,34	0,01	0,12	0,10
21	20	2,086	0,0006	0,10	0,33	0,01	0,12	0,10
22	21	2,080	0,0005	0,10	0,33	0,01	0,11	0,09
23	22	2,074	0,0005	0,10	0,32	0,01	0,11	0,09
24	23	2,069	0,0005	0,10	0,31	0,01	0,11	0,09
25	24	2,064	0,0005	0,09	0,30	0,01	0,11	0,09

$\gamma = 0,15$

			Diâmetro (mm)	Circularidade (μm)	Cilindricidad e (μm)	Rugosidade R_a (μm)	Rugosidade R_{max} (μm)	Rugosidade R_z (μm)
IM			0,0014	0,15	0,45	0,02	0,13	0,09
Desvio Padrão, s			6,13E-04	0,1129	0,3679	0,0133	0,1294	0,1071
Variância, s^2			3,76E-07	1,27E-02	1,35E-01	1,77E-04	1,68E-02	1,15E-02
n	GL	t	2a	2a	2a	2a	2a	2a
2	1	4,165	0,0110	0,66	2,17	0,08	0,76	0,63
3	2	2,282	0,0016	0,30	0,97	0,04	0,34	0,28
4	3	1,924	0,0012	0,22	0,71	0,03	0,25	0,21
5	4	1,778	0,0010	0,18	0,59	0,02	0,21	0,17
6	5	1,699	0,0009	0,16	0,51	0,02	0,18	0,15
7	6	1,650	0,0008	0,14	0,46	0,02	0,16	0,13
8	7	1,617	0,0007	0,13	0,42	0,02	0,15	0,12
9	8	1,592	0,0007	0,12	0,39	0,01	0,14	0,11
10	9	1,574	0,0006	0,11	0,37	0,01	0,13	0,11
11	10	1,559	0,0006	0,11	0,35	0,01	0,12	0,10
12	11	1,548	0,0005	0,10	0,33	0,01	0,12	0,10
13	12	1,538	0,0005	0,10	0,31	0,01	0,11	0,09

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre o diâmetro do furo

Tratam.	Peças	D150	Efeitos														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e	8	11,986	A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CE	DE	
a	17	11,980	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
b	22	11,986	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	
abe	19	11,981	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	
c	15	11,985	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	
ace	28	11,982	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
bce	29	11,987	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
abc	9	11,981	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	
d	12	11,984	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	
ade	27	11,982	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	
bde	20	11,986	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	
abd	33	11,980	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
cde	10	11,983	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	
acd	3	11,982	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	
bcd	4	11,984	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	
abcde	7	11,981	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Or	Ef.	Estim.	Prob.
15	AD	0,001	3,33
14	E	0,001	10,00
13	AC	0,001	16,67
12	B	0,000	23,33
11	BE	0,000	30,00
10	BC	0,000	36,67
9	C	0,000	43,33
8	AE	0,000	50,00
7	BD	0,000	56,67
6	DE	0,000	63,33
5	CD	0,000	70,00
4	CE	0,000	76,67
3	D	-0,001	83,33
2	AB	-0,001	90,00
1	A	-0,004	96,67

Ef.	D150xEf.
1	A -0,00400
2	B 0,00025
3	C 0,00000
4	D -0,00075
5	E 0,00075
6	AB -0,00100
7	AC 0,00075
8	AD 0,00100
9	AE 0,00000
10	BC 0,00000
11	BD -0,00025
12	BE 0,00025
13	CD -0,00050
14	CE -0,00050
15	DE -0,00025

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre o diâmetro do furo

Varição	Soma quad.	G.L.	Quadrado médio	F ₀	NS
A	0,00006	1	0,00006	50,48	1%
Erro	0,00002	14	0,000001		
Total	0,00008	15			

SS_{model} = SS_A

SS_{model} = 0,00006

% = 78,29

α	F _{crit}
0,1	3,10
0,05	4,60
0,01	8,86

Tratam.	Observ. y	Estim. y [^]	Resíduo e = y - y [^]
e	11,986	11,985	0,0009
a	11,980	11,981	-0,0011
b	11,986	11,985	0,0009
abc	11,981	11,981	-0,0001
c	11,985	11,985	-0,0001
ace	11,982	11,981	0,0009
bce	11,987	11,985	0,0019
abc	11,981	11,981	-0,0001
d	11,984	11,985	-0,0011
ade	11,982	11,981	0,0009
bde	11,986	11,985	0,0009
abd	11,980	11,981	-0,0011
cde	11,983	11,985	-0,0021
acd	11,982	11,981	0,0009
bcd	11,984	11,985	-0,0011
abcde	11,981	11,981	-0,0001
Média	11,983		

k	e	Prob.
1	-0,00212	3,13
2	-0,00113	9,38
3	-0,00113	15,63
4	-0,00112	21,88
5	-0,00112	28,13
6	-0,00013	34,38
7	-0,00012	40,63
8	-0,00012	46,88
9	-0,00012	53,13
10	0,00088	59,38
11	0,00088	65,63
12	0,00088	71,88
13	0,00088	78,13
14	0,00088	84,38
15	0,00088	90,63
16	0,00188	96,88

Diâmetros - Valores dos colos da peça

Peça	Diâmetro inicial - alargamento					Ferramenta D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
8	11,960	11,958	11,957	11,957	11,958	11,988	11,985	11,986	11,985	11,986
17	11,948	11,947	11,942	11,948	11,946	11,981	11,978	11,981	11,980	11,980
22	11,956	11,954	11,956	11,958	11,956	11,986	11,985	11,984	11,987	11,986
19	11,948	11,948	11,944	11,951	11,948	11,982	11,981	11,980	11,981	11,981
15	11,946	11,955	11,956	11,958	11,954	11,985	11,984	11,984	11,986	11,985
28	11,946	11,942	11,946	11,953	11,947	11,983	11,980	11,981	11,984	11,982
29	11,962	11,956	11,960	11,964	11,961	11,988	11,986	11,988	11,986	11,987
9	11,950	11,946	11,948	11,945	11,947	11,981	11,981	11,981	11,979	11,981
12	11,951	11,954	11,950	11,952	11,952	11,984	11,985	11,983	11,985	11,984
27	11,949	11,941	11,940	11,951	11,946	11,980	11,982	11,981	11,983	11,982
20	11,953	11,952	11,950	11,955	11,953	11,986	11,985	11,986	11,987	11,986
33	11,949	11,943	11,936	11,945	11,944	11,980	11,979	11,980	11,981	11,980
10	11,951	11,948	11,952	11,951	11,951	11,982	11,983	11,983	11,983	11,983
3	11,951	11,954	11,938	11,945	11,947	11,981	11,982	11,981	11,983	11,982
4	11,949	11,951	11,954	11,956	11,953	11,984	11,982	11,982	11,986	11,984
7	11,942	11,949	11,941	11,945	11,944	11,982	11,978	11,979	11,984	11,981

Peça	Ferramenta D50					Ferramenta D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
8	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0013	12,0010	12,0007	12,0012	12,0011
17	11,999	11,996	11,998	11,998	11,998	12,0019	12,0018	12,0017	12,0018	12,0018
22	12,000	11,997	12,000	12,000	12,000	12,0020	12,0017	12,0015	12,0021	12,0018
19	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0013	12,0005	12,0003	12,0013	12,0009
15	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0010	12,0008	12,0009	12,0008	12,0009
28	11,999	11,997	11,998	11,999	11,998	12,0018	12,0015	12,0013	12,0017	12,0016
29	11,997	11,995	11,996	11,997	11,997	12,0003	11,9998	11,9996	12,0004	12,0000
9	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0011	12,0012	12,0006	12,0015	12,0011
12	11,998	11,996	11,998	11,998	11,997	12,0012	12,0009	12,0008	12,0010	12,0010
27	11,998	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0006	12,0007	12,0001	12,0007	12,0005
20	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0010	12,0007	12,0003	12,0011	12,0008
33	11,997	11,995	11,996	11,997	11,997	12,0040	11,9992	11,9987	11,9990	12,0002
10	11,997	11,995	11,997	11,997	11,997	12,0009	12,0003	12,0002	12,0002	12,0004
3	11,999	11,996	11,998	11,998	11,998	12,0013	12,0011	12,0006	12,0013	12,0011
4	11,997	11,996	11,997	11,999	11,997	12,0015	12,0012	12,0008	12,0034	12,0017
7	11,997	11,996	11,997	11,997	11,997	12,0012	12,0010	12,0010	12,0013	12,0011

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre a circularidade do furo

Tratam.	Peças	D150	Efeitos														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e	8	2,78	A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
a	17	2,38	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
b	22	2,64	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
abe	19	2,99	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
c	15	2,71	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1
ace	28	2,81	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
bce	29	2,96	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
abc	9	2,92	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
d	12	2,73	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
ade	27	2,92	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
bde	20	3,36	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
abd	33	3,05	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
cde	10	2,88	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
acd	3	3,18	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
bcd	4	3,05	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
abcde	7	3,20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tratam.	Ef. D150xEf.
1	A 0,0425
2	B 0,2225
3	C 0,1075
4	D 0,2725
5	E 0,1550
6	AB -0,0050
7	AC 0,0850
8	AD 0,0400
9	AE -0,0575
10	BC -0,0850
11	BD 0,0150
12	BE 0,0575
13	CD -0,0450
14	CE -0,1575
15	DE -0,0675

Or Ef.	Estim.	Prob.
15	D 0,273	3,33
14	B 0,223	10,00
13	E 0,155	16,67
12	C 0,108	23,33
11	AC 0,085	30,00
10	BE 0,058	36,67
9	A 0,043	43,33
8	AD 0,040	50,00
7	BD 0,015	56,67
6	AB -0,005	63,33
5	CD -0,045	70,00
4	AE -0,058	76,67
3	DE -0,068	83,33
2	BC -0,085	90,00
1	CE -0,158	96,67

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre a circularidade do furo

Varição	Soma Quad	GL	Quadrad o médio	Fo	NS
D	0,30	1	0,30	13,32	1%
B	0,20	1	0,20	8,88	5%
E	0,11	1	0,11	4,93	5%
Error	0,27	12	0,02		
Total	0,87	15			

α	F _{crit}
0,1	3,18
0,05	4,75
0,01	9,33

$$SS_{\text{model}} = SS_D + SS_B + SS_E$$

$$SS_{\text{model}} = 0,60$$

$$\% = 69,33$$

Tratam.	Observ.	Estim.	Resíduo	Ordem crescente
e	y	y [^]	e = y - y [^]	k e Prob.
e	2,78	2,74	0,04	1 -0,20 3,13
a	2,38	2,58	-0,20	2 -0,19 9,38
b	2,64	2,81	-0,17	3 -0,17 15,63
abc	2,99	2,96	0,03	4 -0,13 21,88
c	2,71	2,74	-0,03	5 -0,09 28,13
ace	2,81	2,58	0,23	6 -0,04 34,38
bce	2,96	2,81	0,15	7 -0,03 40,63
abc	2,92	2,96	-0,04	8 -0,03 46,88
d	2,73	2,86	-0,13	9 0,02 53,13
ade	2,92	3,01	-0,09	10 0,03 59,38
bde	3,36	3,24	0,12	11 0,04 65,63
abd	3,05	3,08	-0,03	12 0,12 71,88
cde	2,88	2,86	0,02	13 0,12 78,13
acd	3,18	3,01	0,17	14 0,15 84,38
bed	3,05	3,24	-0,19	15 0,17 90,63
abode	3,20	3,08	0,12	16 0,23 96,88
Média	2,91			

Erros de circularidade (μm) - Valores dos colos da peça

Peça	Erro de circularidade inicial - alargamento				
	$\varnothing 1$	$\varnothing 2$	$\varnothing 3$	$\varnothing 4$	Média
8	3,55	2,98	3,20	2,94	3,17
17	4,01	3,74	5,00	3,24	4,00
22	7,06	4,50	4,31	4,20	5,02
19	6,07	6,41	7,74	6,98	6,80
15	4,77	3,20	3,13	3,89	3,75
28	5,04	5,49	5,30	4,08	4,98
29	5,11	3,89	4,46	6,79	5,06
9	4,96	4,20	4,39	9,01	5,64
12	2,78	2,75	2,33	2,82	2,67
27	4,58	4,35	4,20	6,64	4,94
20	8,20	5,34	5,15	6,10	6,20
33	7,97	5,15	4,12	3,93	5,29
10	4,31	4,46	3,93	3,74	4,11
3	4,62	3,85	5,04	7,52	5,26
4	3,51	4,31	3,85	3,85	3,88
7	6,03	5,95	5,54	5,47	5,75
	Média				4,78

Ferramenta D150				
$\varnothing 1$	$\varnothing 2$	$\varnothing 3$	$\varnothing 4$	Média
2,75	2,67	2,48	3,20	2,78
2,98	2,25	2,40	1,87	2,38
1,95	2,86	3,20	2,56	2,64
4,20	2,40	3,13	2,21	2,99
2,52	2,90	2,82	2,59	2,71
3,01	2,21	2,98	3,05	2,81
2,82	3,36	2,78	2,86	2,96
2,82	2,69	3,05	3,13	2,92
3,36	2,48	2,78	2,29	2,73
3,20	2,82	2,48	3,17	2,92
4,12	3,01	2,67	3,62	3,36
3,51	2,29	3,32	3,09	3,05
3,36	2,56	2,52	3,09	2,88
2,75	3,28	3,09	3,59	3,18
3,59	2,63	2,78	3,20	3,05
3,31	2,85	3,20	3,45	3,20
	Média			2,91

Peça	Ferramenta D50				
	$\varnothing 1$	$\varnothing 2$	$\varnothing 3$	$\varnothing 4$	Média
8	1,41	0,92	1,98	1,34	1,41
17	1,22	1,14	0,69	0,84	0,97
22	1,43	1,25	1,69	1,42	1,45
19	2,02	0,88	1,75	2,02	1,67
15	1,30	1,18	1,30	1,03	1,20
28	1,60	1,41	1,68	2,56	1,81
29	1,14	1,34	0,95	1,03	1,12
9	1,30	1,14	1,33	1,52	1,32
12	1,34	0,99	1,83	1,30	1,37
27	1,87	1,18	1,45	1,68	1,55
20	1,30	0,72	1,11	1,11	1,06
33	1,56	1,03	1,26	0,95	1,20
10	2,21	1,22	1,30	1,41	1,54
3	1,41	1,60	2,02	1,34	1,59
4	2,40	0,92	1,34	1,22	1,47
7	1,92	1,61	1,70	1,85	1,77
	Média				1,41

Ferramenta D30				
$\varnothing 1$	$\varnothing 2$	$\varnothing 3$	$\varnothing 4$	Média
0,65	0,53	0,99	0,80	0,74
0,38	0,42	0,50	0,53	0,46
0,84	0,57	0,92	0,42	0,69
0,65	0,46	0,92	1,11	0,79
0,42	0,46	0,46	0,46	0,45
0,53	0,57	0,69	0,88	0,67
0,50	0,53	0,69	0,61	0,58
0,72	0,55	0,64	0,59	0,63
0,80	0,53	1,07	0,84	0,81
0,72	0,42	0,50	0,53	0,54
0,65	0,42	0,42	0,53	0,51
0,61	0,57	0,65	0,57	0,60
0,65	0,53	0,57	0,57	0,58
1,34	0,46	0,72	0,53	0,76
3,36	0,42	3,36	0,53	1,92
0,87	0,75	0,77	0,88	0,82
	Média			0,72

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre o erro de cilindricidade do furo

Tratam.	Efeitos														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
e	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
a	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1
b	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
abe	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
c	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
ace	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
bce	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
abc	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
d	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
ade	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
bde	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
abd	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
cde	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
acd	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
bcd	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
abcde	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tratam.	Peças	D150
e	8	3,97
a	17	3,32
b	22	4,65
abe	19	4,73
c	15	4,35
ace	28	4,16
bce	29	4,04
abc	9	4,96
d	12	3,62
ade	27	4,12
bde	20	4,69
abd	33	4,31
cde	10	4,27
acd	3	4,12
bcd	4	4,84
abcde	7	4,39

Ef.	D150xEf.
1 A	-0,0400
2 B	0,5850
3 C	0,2150
4 D	0,0225
5 E	0,0250
6 AB	0,0825
7 AC	0,0725
8 AD	-0,0800
9 AE	0,1475
10 BC	-0,2525
11 BD	-0,0600
12 BE	-0,2525
13 CD	0,0050
14 CE	-0,3775
15 DE	0,1200

Or	Ef.	Estim.	Prob.
15	B	0,585	3,33
14	C	0,215	10,00
13	AE	0,148	16,67
12	DE	0,120	23,33
11	AB	0,082	30,00
10	AC	0,073	36,67
9	E	0,025	43,33
8	D	0,023	50,00
7	CD	0,005	56,67
6	A	-0,040	63,33
5	BD	-0,060	70,00
4	AD	-0,080	76,67
3	BC	-0,253	83,33
2	BE	-0,253	90,00
1	CE	-0,378	96,67

Análise de variância dos efeitos dos parâmetros de entrada sobre o erro de cilindridade do furo

Varição	Soma quad.	G.L	Quadrado médio	F ₀	NS
B	1,37	1	1,37	56,13	1%
C	0,20	1	0,20	8,09	5%
BE	0,26	1	0,26	10,46	1%
BC	0,26	1	0,26	10,46	1%
CE	0,57	1	0,57	23,37	1%
Erro	0,24	10	0,02		
Total	2,89	15			

α	F _{crit}
0,1	3,29
0,05	4,96
0,01	10,04

$$SS_{\text{model}} = SS_B + SS_C + SS_{BE} + SS_{BC} + SS_{CE}$$

$$SS_{\text{model}} = 2,65$$

$$\% = 91,56$$

Tratam.	Observ.	Estim	Resíduo	Ordem crescente
e	y	y [^]	e = y - y [^]	k e Prob.
e	3,97	4,07	-0,10	1 -0,223 3,13
a	3,32	3,44	-0,12	2 -0,203 9,38
b	4,65	4,53	0,12	3 -0,168 15,63
abc	4,73	4,66	0,07	4 -0,122 21,88
c	4,35	4,29	0,06	5 -0,103 28,13
ace	4,16	4,16	0,00	6 -0,032 34,38
bce	4,04	4,24	-0,20	7 -0,002 40,63
abc	4,96	4,87	0,09	8 0,033 46,88
d	3,62	3,44	0,18	9 0,048 53,13
ade	4,12	4,07	0,05	10 0,063 59,38
bde	4,69	4,66	0,03	11 0,073 65,63
abd	4,31	4,53	-0,22	12 0,088 71,88
cde	4,27	4,16	0,11	13 0,108 78,13
acd	4,12	4,29	-0,17	14 0,118 84,38
bcd	4,84	4,87	-0,03	15 0,147 90,63
abcde	4,39	4,24	0,15	16 0,178 96,88
Média	4,28			

Otimização do processo de brunimento

Otimização da velocidade periférica - Medições

Ferramenta D50

Vel. Per. m/min	Peça	Diâmetro (mm)				Rugosidade Ra (µm)				Rugosidade Rz (µm)				Cilindricidade (µm)			
		Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2		Ø3	Ø4	Média
16	3D	11,9954	11,9948	11,9957	11,9949	11,9952	0,412	0,323	0,359	0,381	0,369	2,576	2,325	2,208	2,349	2,365	1,56
	3E	11,9958	11,9950	11,9960	11,9944	11,9953	0,371	0,327	0,370	0,393	0,365	2,399	2,088	2,297	2,527	2,328	1,56
	3A	11,9953	11,9954	11,9952	11,9951	11,9953	0,394	0,395	0,388	0,416	0,398	2,366	2,125	2,445	2,898	2,459	1,54
20	3F	11,9960	11,9943	11,9945	11,9944	11,9948	0,388	0,378	0,368	0,352	0,372	2,644	2,262	2,429	2,404	2,435	1,49
	3G	11,9963	11,9945	11,9950	11,9940	11,9950	0,404	0,445	0,367	0,343	0,390	2,426	2,589	2,410	2,327	2,438	1,68
	3B	11,9964	11,9944	11,9947	11,9942	11,9949	0,385	0,365	0,377	0,375	0,376	2,546	2,448	2,384	2,318	2,424	1,62
26	3H	11,9945	11,9941	11,9952	11,9948	11,9947	0,364	0,354	0,349	0,359	0,357	2,220	2,203	2,261	2,310	2,249	1,72
	3I	11,9957	11,9941	11,9934	11,9937	11,9942	0,356	0,353	0,356	0,353	0,355	1,972	2,440	2,475	2,370	2,314	1,68
	3O	11,9955	11,9940	11,9944	11,9944	11,9946	0,352	0,348	0,344	0,334	0,345	2,134	2,223	2,110	2,340	2,202	1,75
		Min.	11,9964				Min.	0,4450			Min.	2,898				Min.	1,75
		Max.	11,9934				Max.	0,3230			Max.	1,972				Max.	1,49
		σ	0,000740				σ	0,0258			σ	0,177				σ	0,09

Ferramenta D30

Vel. Per. m/min	Peça	Diâmetro (mm)				Rugosidade Ra (µm)				Rugosidade Rz (µm)				Cilindricidade (µm)			
		Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2		Ø3	Ø4	Média
20	3C	12,0008	12,0005	12,0009	12,0007	12,0007	0,175	0,140	0,174	0,136	0,156	1,248	1,003	1,305	1,097	1,163	0,92
	3J	12,0006	12,0004	12,0003	12,0008	12,0005	0,186	0,110	0,164	0,133	0,148	1,021	0,714	1,206	1,100	1,010	1,07
	3P	12,0004	12,0008	12,0001	12,0004	12,0004	0,177	0,165	0,175	0,159	0,169	1,315	1,254	1,233	1,187	1,247	0,66
26	3K	12,0003	12,0002	12,0009	12,0008	12,0006	0,157	0,153	0,143	0,146	0,150	1,164	1,147	1,073	1,045	1,107	0,65
	3L	12,0006	12,0008	12,0007	12,0010	12,0008	0,148	0,158	0,160	0,137	0,151	1,066	1,211	1,102	1,057	1,109	1,03
	3Q	12,0009	12,0006	12,0008	12,0010	12,0008	0,134	0,138	0,145	0,148	0,141	1,103	1,088	1,067	1,202	1,115	1,08
31	3M	12,0010	12,0008	12,0010	12,0014	12,0011	0,157	0,148	0,185	0,144	0,159	1,131	0,938	0,964	1,111	1,036	1,03
	3N	12,0013	12,0007	12,0005	12,0015	12,0010	0,153	0,145	0,161	0,181	0,160	1,073	0,927	1,048	1,085	1,033	0,98
	3R	12,0014	12,0003	12,0008	12,0016	12,0010	0,154	0,144	0,148	0,134	0,145	1,120	1,002	0,934	0,925	0,995	1,15
		Min.	12,0016				Min.	0,1860			Min.	1,315				Min.	1,15
		Max.	12,0001				Max.	0,1100			Max.	0,714				Max.	0,65
		σ	0,00036				σ	0,0167			σ	0,121				σ	0,18

Teste múltiplo de Duncan - Diâmetro

Ferramenta D50

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
16	11,9952	11,9953	11,9953	35,9858	y ₁ 11,9953
20	11,9948	11,9950	11,9949	35,9847	y ₂ 11,9949
26	11,9947	11,9942	11,9946	35,9835	y ₃ 11,9945
				107,954	11,9949

Médias ordenadas	
y ₃	11,9945
y ₂	11,9949
y ₁	11,9953

R _p	
R ₂	0,00028
R ₃	0,00029

Comparações
R_p

1 - 3:	0,0008	>	0,00029	difere significativamente
1 - 2:	0,0004	>	0,00028	difere significativamente
2 - 3:	0,0004	>	0,00028	difere significativamente

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,0000010
SS_{Tratam.} = 0,0000009
SS_E = 0,0000001
S_{y₁} = 0,0000819

Análise de variância

Variación	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F ₀
Velocidade	0,0000009	2	0,00000044	21,92
Erro	0,0000001	6	0,00000002	
Total	0,0000010	8		

α = 0,05	F _{crit.}
F _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05
F _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01
	10,92

Ferramenta D30

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
20	12,0007	12,0005	12,0004	36,0017	y ₁ 12,0006
26	12,0006	12,0008	12,0008	36,0022	y ₂ 12,0007
31	12,0011	12,0010	12,0010	36,0031	y ₃ 12,0010
				108,007	12,0008

Médias ordenadas	
y ₁	12,0006
y ₂	12,0007
y ₃	12,0010

R _p	
R ₂	0,00028
R ₃	0,00029

Comparações
R_p

3 - 1:	0,0005	>	0,00029	difere significativamente
3 - 2:	0,0003	>	0,00028	difere significativamente
2 - 1:	0,0002	<	0,00028	não difere significativamente

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,0000004
SS_{Tratam.} = 0,0000003
SS_E = 0,0000001
S_{y₁} = 0,0000710

Análise de variância

Variación	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F ₀
Velocidade	0,0000003	2	0,00000017	11,16
Erro	0,0000001	6	0,00000002	
Total	0,0000004	8		

α = 0,05	F _{crit.}
F _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05
F _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01
	10,92

Otimização do processo de brunimento

Teste múltiplo de Duncan - Erro de cilindridade

Ferramenta D50

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
16	1,56	1,54	1,54	4,66	y ₁ 1,55
20	1,49	1,68	1,62	4,79	y ₂ 1,60
26	1,72	1,68	1,75	5,15	y ₃ 1,72
				14,60	1,62

Médias ordenadas
y ₁ 1,55
y ₂ 1,60
y ₃ 1,72

R _o
R ₂ 0,120
R ₃ 0,124

Comparações

y₁ R_p

- 3 - 1: 0,1633 > 0,124 difere significativamente
- 3 - 2: 0,1200 > 0,120 difere significativamente
- 2 - 1: 0,0433 < 0,120 não difere significativamente

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,06456
SS_{Tratam.} = 0,04296
SS_E = 0,02160
S_{y_i} = 0,03464

Análise de variância

Variación	Soma quad.	GL	Quadra do médio	F ₀
Velocidade	0,0430	2	0,0215	5,97
Erro	0,0216	6	0,0036	
Total	0,0646	8		

α = 0,05	F _{crit.}
t _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05 5,14
t _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01 10,92

Ferramenta D30

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
20	0,92	1,07	0,66	2,65	y ₁ 0,88
26	0,65	1,03	1,08	2,76	y ₂ 0,92
31	1,03	0,98	1,15	3,16	y ₃ 1,05
				8,57	0,95

Médias ordenadas
y ₁ 0,88
y ₂ 0,92
y ₃ 1,05

R _o
R ₂ 0,120
R ₃ 0,124

Comparações

y₁ R_o

- 3 - 1: 0,170 > 0,124 difere significativamente
- 3 - 2: 0,133 > 0,120 difere significativamente
- 2 - 1: 0,037 < 0,120 não difere significativamente

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,2600
SS_{Tratam.} = 0,0480
SS_E = 0,2119
S_{y_i} = 0,1085

Análise de variância

Variación	Soma quad.	GL	Quadra do médio	F ₀
Velocidade	0,048	2	0,0240	0,68
Erro	0,212	6	0,0353	
Total	0,260	8		

α = 0,05	F _{crit.}
t _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05 5,14
t _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01 10,92

Otimização do processo de brunimento

Teste múltiplo de Duncan - Rugosidade R_a

Ferramenta D50

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
16	0,369	0,365	0,398	1,132	y ₁ 0,377
20	0,372	0,390	0,376	1,137	y ₂ 0,379
26	0,357	0,355	0,345	1,056	y ₃ 0,352
				3,325	0,369

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,00231
SS_{Treatm.} = 0,00139
SS_E = 0,000924
S_{y_i} = 0,00716

Médias ordenadas
y ₃ 0,352
y ₁ 0,377
y ₂ 0,379

Análise de variância				
Variación	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F ₀
Velocidade	0,001390	2	0,000695	4,51
Erro	0,000924	6	0,000154	
Total	0,002314	8		

Comparações	
R _p	y ₁
R ₂	0,0271 > 0,0256 difere significativamente
R ₃	0,0015 < 0,0248 não difere significativamente
	0,0256 > 0,0248 difere significativamente

Análise de variância	
α = 0,05	F _{crit.}
F _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05 5,14
F _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01 10,92

Ferramenta D30

Velocidad e periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
20	0,156	0,148	0,169	0,4735	y ₁ 0,1578
26	0,150	0,151	0,141	0,4418	y ₂ 0,1473
31	0,159	0,160	0,145	0,4635	y ₃ 0,1545
				1,3788	0,1532

n = 3
a = 3
N = 9
SS_T = 0,000586
SS_{Treatm.} = 0,000176
SS_E = 0,000410
S_{y_i} = 0,004773

Médias ordenadas
y ₂ 0,1473
y ₃ 0,1545
y ₁ 0,1578

Análise de variância				
Variación	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F ₀
Velocidade	0,000176	2	0,000088	1,29
Erro	0,000410	6	0,000068	
Total	0,000586	8		

Comparações	
R _p	y ₁
R ₂	0,0106 < 0,0256 não difere significativamente
R ₃	0,0033 < 0,0248 não difere significativamente
	0,0073 < 0,0248 não difere significativamente

Análise de variância	
α = 0,05	F _{crit.}
F _{0,05(2,6)} = 3,46	0,05 5,14
F _{0,05(3,6)} = 3,58	0,01 10,92

Otimização do processo de brunimento

Teste múltiplo de Duncan - Rugosidade R_z

Ferramenta D50

Velocidade periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
16	2,365	2,328	2,459	7,151	y_1 2,384
20	2,435	2,438	2,424	7,297	y_2 2,432
26	2,249	2,314	2,202	6,765	y_3 2,255
				21,212	2,357

Médias ordenadas	
y_3	2,255
y_1	2,384
y_2	2,432

R_p	
R_2	0,1018
R_3	0,1054

Comparações

y_1 R_p

- 2 - 3: 0,1774 > 0,1054 difere significativamente
- 2 - 1: 0,0487 < 0,1018 não difere significativamente
- 1 - 3: 0,1288 > 0,1018 difere significativamente

Análise de variância

Varição	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F_0
Velocidade	0,05042	2	0,02521	9,70
Erro	0,01559	6	0,00260	
Total	0,06601	8		

$\alpha = 0,05$	F_{crit}
$f_{0,05}(2,6) = 3,46$	0,05
$f_{0,05}(3,6) = 3,58$	0,01
	10,92

$n = 3$
 $a = 3$
 $N = 9$
 $SS_T = 0,06601$
 $SS_{Tratam.} = 0,05042$
 $SS_E = 0,01559$
 $S_{pi} = 0,02943$

Ferramenta D30

Velocidade periférica (m/min)	Peças			Soma	Médias
	1	2	3		
20	1,163	1,010	1,247	3,421	y_1 1,140
26	1,107	1,107	1,115	3,330	y_2 1,110
31	1,036	1,033	0,995	3,065	y_3 1,022
				9,815	1,091

Médias ordenadas	
y_3	1,0215
y_2	1,1098
y_1	1,1403

R_p	
R_2	0,1018
R_3	0,1054

Comparações

y_1 R_p

- 1 - 3: 0,1188 > 0,1054 difere significativamente
- 1 - 2: 0,0304 < 0,1018 não difere significativamente
- 2 - 3: 0,0883 < 0,1018 não difere significativamente

Análise de variância

Varição	Soma quad.	GL	Quadrado médio	F_0
Velocidade	0,02283	2	0,01141	2,29
Erro	0,02996	6	0,00499	
Total	0,05278	8		

$\alpha = 0,05$	F_{crit}
$f_{0,05}(2,6) = 3,46$	0,05
$f_{0,05}(3,6) = 3,58$	0,01
	10,9

$n = 3$
 $a = 3$
 $N = 9$
 $SS_T = 0,05278$
 $SS_{Tratam.} = 0,02283$
 $SS_E = 0,02996$
 $S_{pi} = 0,04079$

Comprovação estatística dos resultados**Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento****Diâmetro (mm)**

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	11,9285	11,9281	11,9276	11,9286	11,9282	11,9892	11,9888	11,9895	11,9900	11,9894
2	11,9291	11,9284	11,9291	11,9282	11,9287	11,9880	11,9859	11,9864	11,9881	11,9871
3	11,9297	11,9294	11,9281	11,9284	11,9289	11,9905	11,9901	11,9888	11,9900	11,9899
4	11,9275	11,9274	11,9264	11,9269	11,9271	11,9900	11,9895	11,9889	11,9896	11,9895
5	11,9028	11,8912	11,9047	11,8802	11,8947	11,9880	11,9890	11,9885	11,9886	11,9885
6	11,9280	11,9284	11,9284	11,9279	11,9282	11,9894	11,9896	11,9889	11,9881	11,9890
7	11,9280	11,9284	11,9279	11,9285	11,9282	11,9894	11,9888	11,9890	11,9895	11,9892
8	11,9262	11,9273	11,9276	11,9289	11,9275	11,9899	11,9905	11,9894	11,9895	11,9898
9	11,9285	11,9278	11,9280	11,9274	11,9279	11,9895	11,9912	11,9899	11,9902	11,9902
10	11,9255	11,9279	11,9282	11,9290	11,9277	11,9892	11,9885	11,9880	11,9885	11,9886
11	11,9283	11,9290	11,9293	11,9279	11,9286	11,9889	11,9890	11,9895	11,9894	11,9892
12	11,9284	11,9273	11,9285	11,9282	11,9281	11,9888	11,9891	11,9887	11,9879	11,9886
14	11,9287	11,9280	11,9277	11,9277	11,9280	11,9895	11,9894	11,9894	11,9899	11,9896
15	11,9266	11,9274	11,9269	11,9286	11,9274	11,9890	11,9894	11,9897	11,9889	11,9893
16	11,9282	11,9283	11,9277	11,9288	11,9283	11,9894	11,9888	11,9887	11,9890	11,9890
17	11,9285	11,9286	11,9289	11,9275	11,9284	11,9884	11,9899	11,9901	11,9894	11,9895
18	11,9287	11,9273	11,9281	11,9265	11,9277	11,9899	11,9889	11,9883	11,9882	11,9888
19	11,9300	11,9279	11,9281	11,9282	11,9286	11,9890	11,9894	11,9891	11,9888	11,9891
20	11,9274	11,9286	11,9284	11,9290	11,9284	11,9896	11,9889	11,9890	11,9886	11,9890
21	11,9282	11,9288	11,9281	11,9286	11,9284	11,9896	11,9890	11,9887	11,9908	11,9895

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	11,9938	11,9948	11,9946	11,9946	11,9945	12,0002	12,0004	12,0005	12,0004	12,0004
2	11,9941	11,9943	11,9949	11,9942	11,9944	12,0005	12,0005	12,0004	12,0002	12,0004
3	11,9966	11,9965	11,9958	11,9966	11,9964	12,0004	12,0007	12,0004	12,0004	12,0005
4	11,9938	11,9944	11,9945	11,9951	11,9945	12,0005	12,0004	11,9998	12,0005	12,0003
5	11,9946	11,9947	11,9927	11,9945	11,9941	12,0004	12,0005	12,0005	12,0004	12,0005
6	11,9946	11,9937	11,9949	11,9931	11,9941	12,0006	12,0005	12,0001	12,0004	12,0004
7	11,9939	11,9945	11,9948	11,9949	11,9945	12,0008	12,0007	12,0002	12,0008	12,0006
8	11,9951	11,9955	11,9948	11,9944	11,9950	12,0006	12,0001	12,0001	12,0005	12,0003
9	11,9941	11,9945	11,9940	11,9948	11,9944	12,0002	12,0008	12,0005	12,0004	12,0005
10	11,9943	11,9944	11,9943	11,9944	11,9944	12,0009	12,0007	12,0007	12,0004	12,0007
11	11,9943	11,9950	11,9950	11,9954	11,9949	12,0009	12,0008	12,0007	12,0010	12,0009
12	11,9947	11,9945	11,9948	11,9950	11,9948	12,0010	12,0008	12,0007	12,0003	12,0007
14	11,9946	11,9952	11,9950	11,9946	11,9949	12,0007	12,0005	12,0004	12,0003	12,0005
15	11,9948	11,9950	11,9956	11,9953	11,9952	12,0004	12,0008	12,0011	12,0009	12,0008
16	11,9945	11,9954	11,9949	11,9952	11,9950	12,0010	12,0011	12,0010	12,0008	12,0010
17	11,9942	11,9951	11,9945	11,9955	11,9948	12,0011	12,0006	12,0004	12,0008	12,0007
18	11,9980	11,9976	11,9982	11,9965	11,9976	12,0009	12,0005	12,0002	12,0006	12,0006
19	11,9940	11,9948	11,9951	11,9944	11,9946	12,0007	12,0009	12,0005	12,0004	12,0006
20	11,9943	11,9953	11,9947	11,9949	11,9948	12,0006	12,0009	12,0006	12,0008	12,0007
21	11,9938	11,9949	11,9950	11,9952	11,9947	12,0003	12,0008	12,0006	12,0008	12,0006

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Cilindricidade (μm)

Peça	Alargamento	Brunimento		
		Desbaste D150	Semi-acabam. D50	Acabamento D30
1	4,92	3,74	1,95	1,11
2	4,96	3,93	1,56	1,03
3	5,15	3,55	1,60	0,95
4	4,31	3,20	1,53	0,92
5	4,88	4,39	2,14	1,14
6	4,27	3,36	1,34	1,11
7	4,58	4,01	1,60	0,95
8	3,78	3,97	1,72	1,07
9	4,96	4,08	1,60	1,03
10	5,53	4,77	1,72	0,84
11	5,72	4,23	2,33	1,11
12	4,43	4,35	2,02	0,88
14	5,80	3,51	1,75	0,95
15	3,89	4,23	1,30	0,65
16	3,70	3,74	2,37	1,11
17	5,04	4,46	1,60	1,26
18	5,11	3,43	1,30	1,18
19	5,49	4,92	2,02	0,88
20	4,69	4,01	2,21	1,11
21	4,54	4,12	2,29	0,99

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_a (μm) - apalpador mecânico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	1,23	1,43	2,08	1,27	1,50	1,20	1,11	1,05	0,95	1,08
2	1,03	1,51	0,96	1,03	1,13	1,24	0,98	1,03	1,09	1,09
3	1,36	1,27	1,60	1,26	1,37	1,12	0,98	0,97	0,82	0,97
4	1,57	1,19	1,70	1,31	1,44	1,14	0,95	0,87	1,04	1,00
5	1,01	1,09	1,32	1,23	1,16	1,14	0,89	1,09	1,31	1,11
6	1,60	1,39	1,28	1,52	1,45	0,93	1,01	1,20	0,89	1,01
7	1,29	1,11	1,16	1,05	1,15	0,97	1,15	1,17	1,24	1,13
8	1,35	1,26	1,53	1,35	1,37	1,38	1,20	0,95	1,32	1,21
9	1,10	1,26	1,37	1,30	1,26	1,11	0,98	1,03	1,07	1,05
10	1,14	1,18	1,19	1,14	1,16	1,00	0,96	1,05	0,99	1,00
11	1,37	1,44	1,18	1,49	1,37	1,38	1,10	1,14	0,95	1,14
12	1,37	1,19	1,10	1,30	1,24	1,12	1,14	0,92	1,31	1,12
14	1,46	1,53	1,21	0,91	1,28	1,13	1,00	0,99	0,77	0,97
15	1,56	0,95	1,26	1,60	1,34	0,98	0,94	1,05	1,03	1,00
16	1,17	1,13	1,34	1,26	1,23	1,21	0,92	1,17	1,04	1,09
17	1,69	1,34	1,11	1,35	1,37	1,03	1,12	1,16	1,09	1,10
18	1,00	1,06	1,10	1,62	1,20	1,02	0,89	0,82	1,11	0,96
19	1,08	1,13	1,37	1,26	1,21	1,13	0,84	1,07	1,19	1,06
20	1,34	1,41	1,27	1,11	1,28	1,28	1,38	1,34	1,05	1,26
21	1,42	1,28	1,52	1,17	1,35	0,87	1,08	1,16	0,97	1,02

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	0,471	0,415	0,398	0,429	0,428	0,134	0,183	0,136	0,148	0,150
2	0,387	0,402	0,514	0,439	0,436	0,185	0,158	0,155	0,191	0,172
3	0,485	0,450	0,549	0,301	0,446	0,111	0,142	0,162	0,147	0,141
4	0,499	0,399	0,506	0,420	0,456	0,160	0,151	0,163	0,166	0,160
5	0,456	0,415	0,428	0,349	0,412	0,179	0,186	0,185	0,139	0,172
6	0,487	0,389	0,350	0,449	0,419	0,177	0,166	0,154	0,128	0,156
7	0,478	0,502	0,417	0,477	0,469	0,191	0,138	0,146	0,168	0,161
8	0,419	0,345	0,416	0,550	0,433	0,162	0,157	0,177	0,159	0,164
9	0,487	0,425	0,435	0,468	0,454	0,136	0,166	0,130	0,132	0,141
10	0,404	0,436	0,428	0,488	0,439	0,175	0,161	0,159	0,157	0,163
11	0,484	0,489	0,512	0,430	0,479	0,100	0,072	0,155	0,163	0,123
12	0,506	0,385	0,367	0,446	0,426	0,164	0,185	0,157	0,198	0,176
14	0,493	0,507	0,315	0,283	0,400	0,145	0,150	0,163	0,152	0,153
15	0,450	0,408	0,472	0,493	0,456	0,154	0,163	0,143	0,161	0,155
16	0,464	0,345	0,465	0,529	0,451	0,143	0,133	0,140	0,153	0,142
17	0,333	0,482	0,405	0,344	0,391	0,133	0,146	0,146	0,176	0,150
18	0,430	0,467	0,455	0,468	0,455	0,134	0,144	0,143	0,150	0,143
19	0,414	0,506	0,402	0,520	0,461	0,152	0,160	0,140	0,177	0,157
20	0,487	0,476	0,398	0,433	0,449	0,149	0,153	0,190	0,178	0,168
21	0,318	0,367	0,354	0,397	0,359	0,168	0,166	0,161	0,124	0,155

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_z (μm) - apalpador mecânico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	6,33	6,86	10,25	6,89	7,58	5,81	6,03	5,01	4,70	5,39
2	4,71	7,56	4,86	4,90	5,51	6,71	5,50	4,40	5,50	5,53
3	6,39	6,03	7,86	7,22	6,88	5,83	4,90	6,24	4,16	5,28
4	7,72	7,88	6,05	6,86	7,13	5,56	5,34	6,54	5,55	5,75
5	5,54	5,95	6,53	6,52	6,14	6,23	5,98	4,35	5,93	5,62
6	7,43	6,15	6,59	7,32	6,87	5,04	6,22	6,00	4,93	5,55
7	7,45	5,78	5,50	6,59	6,33	5,57	4,72	5,25	6,63	5,54
8	6,34	6,41	8,13	5,88	6,69	6,89	5,12	5,37	6,42	5,95
9	5,85	5,88	6,94	5,64	6,08	5,99	5,62	6,08	5,49	5,80
10	5,73	7,43	6,22	5,78	6,29	6,01	4,68	6,10	4,63	5,36
11	7,51	7,62	6,47	7,42	7,26	6,42	6,02	6,15	5,15	5,94
12	6,60	7,23	6,20	6,85	6,72	6,29	6,18	6,14	7,14	6,44
14	7,69	8,36	6,19	4,59	6,71	6,04	5,65	4,68	4,56	5,23
15	9,04	5,68	6,63	7,35	7,18	5,63	6,01	4,88	5,92	5,61
16	5,44	5,19	7,14	6,66	6,11	6,82	5,88	5,06	6,74	6,13
17	10,43	6,42	5,82	6,41	7,27	5,27	4,90	6,54	6,69	5,85
18	5,27	5,20	5,65	8,28	6,10	6,27	5,40	5,37	5,92	5,74
19	5,30	6,25	6,20	6,30	6,01	6,00	6,17	5,90	6,68	6,19
20	9,80	6,89	6,27	5,61	7,14	6,63	7,20	6,96	5,85	6,66
21	6,70	5,82	8,61	5,47	6,65	7,91	5,30	5,50	5,31	6,01

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	2,670	3,514	3,215	2,713	3,028	0,930	1,312	1,134	1,155	1,133
2	2,572	2,151	3,015	2,993	2,683	1,682	1,163	1,239	1,537	1,405
3	2,875	2,640	2,364	2,186	2,516	0,861	1,344	1,000	1,224	1,107
4	3,013	2,358	2,875	2,716	2,741	1,125	1,155	1,185	1,255	1,180
5	3,030	3,125	3,456	2,345	2,989	1,242	1,358	1,445	1,080	1,281
6	3,225	2,628	2,145	2,776	2,694	1,259	1,408	1,073	0,930	1,168
7	3,161	3,642	2,035	3,262	3,025	1,419	0,990	1,093	1,443	1,236
8	2,923	3,015	2,642	3,095	2,919	1,198	1,405	1,028	1,131	1,191
9	3,123	2,543	3,025	2,579	2,818	1,015	1,212	0,930	1,022	1,045
10	3,037	2,698	3,125	2,943	2,951	1,409	1,217	1,267	1,179	1,268
11	3,103	2,441	2,546	2,731	2,705	0,907	0,691	1,265	1,233	1,024
12	2,827	3,215	2,348	2,850	2,810	1,387	1,460	1,257	1,453	1,389
14	3,374	3,028	3,017	2,052	2,868	1,009	1,115	1,201	1,297	1,156
15	2,577	2,156	2,254	2,991	2,495	1,196	1,227	1,038	1,127	1,147
16	2,875	3,147	2,987	3,262	3,068	1,111	0,910	0,973	1,147	1,035
17	2,097	3,645	2,875	2,348	2,741	1,102	1,106	1,045	1,235	1,122
18	2,702	2,831	3,054	3,181	2,942	0,973	0,981	1,160	1,263	1,094
19	3,105	3,140	3,010	3,033	3,072	1,240	1,203	1,138	1,439	1,255
20	2,888	3,451	2,878	2,801	3,005	1,283	1,100	1,353	1,390	1,282
21	2,073	2,875	2,567	2,768	2,571	1,394	1,238	1,256	0,892	1,195

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_{max} (μm) - apalpador mecânico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	8,25	7,83	24,07	8,98	12,28	8,08	7,18	5,85	5,48	6,65
2	5,81	13,45	6,39	6,00	7,91	7,08	6,40	5,15	8,05	6,67
3	9,02	9,36	6,24	9,03	8,41	7,61	5,99	6,90	5,09	6,40
4	14,27	11,67	8,93	10,19	11,27	6,55	5,87	7,15	7,96	6,88
5	7,68	8,48	9,27	10,05	8,87	7,80	7,15	6,55	7,63	7,28
6	9,32	7,51	8,89	14,47	10,05	8,28	6,78	7,30	6,40	7,19
7	10,03	11,05	8,27	10,17	9,88	7,84	6,08	6,45	10,10	7,62
8	7,22	8,40	12,26	6,90	8,70	8,38	6,60	5,91	9,53	7,61
9	8,28	6,79	9,62	7,36	8,01	6,48	6,17	6,66	8,54	6,96
10	8,64	11,02	11,09	6,18	9,23	6,99	5,39	7,06	5,16	6,15
11	12,57	12,53	7,98	7,98	10,27	8,18	7,15	7,35	5,65	7,08
12	8,06	7,23	6,20	6,85	7,09	8,83	7,12	6,54	11,47	8,49
14	12,16	12,37	8,13	5,83	9,62	6,49	6,22	5,78	5,53	6,01
15	15,25	8,00	9,40	8,65	10,33	6,65	6,87	5,22	6,38	6,28
16	6,57	6,32	8,93	10,63	8,11	7,54	6,45	6,58	7,91	7,12
17	18,92	8,98	7,44	8,07	10,85	7,68	6,58	7,12	9,20	7,65
18	6,88	6,98	7,05	10,89	7,95	7,86	7,12	6,02	8,26	7,32
19	8,16	7,73	6,50	6,95	7,34	6,63	7,54	6,55	8,40	7,28
20	13,01	9,09	8,22	8,58	9,73	7,12	10,01	10,93	9,06	9,28
21	7,38	6,51	18,01	7,10	9,75	7,23	5,79	6,51	6,79	6,58

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	3,139	4,050	3,546	3,003	3,435	1,175	1,537	1,754	1,270	1,434
2	4,838	3,500	3,648	3,955	3,985	1,714	1,767	1,733	1,642	1,714
3	2,991	2,979	3,154	3,141	3,066	1,035	1,345	1,102	1,568	1,263
4	3,773	2,648	3,245	3,716	3,346	1,512	1,324	1,466	1,434	1,434
5	3,773	3,658	3,879	3,278	3,647	1,815	2,414	1,080	1,215	1,631
6	3,781	3,105	3,028	3,827	3,435	1,536	1,559	1,399	1,173	1,417
7	3,899	4,500	4,215	4,027	4,160	1,746	1,384	1,242	1,548	1,480
8	3,880	3,985	3,050	3,897	3,703	1,527	1,694	1,110	1,414	1,436
9	4,272	3,754	3,654	2,938	3,655	1,194	1,543	1,220	1,354	1,328
10	4,389	3,054	3,625	3,463	3,633	1,674	1,454	1,325	1,521	1,494
11	4,085	3,454	2,689	3,345	3,393	1,279	0,935	1,492	1,640	1,337
12	3,124	3,548	3,220	3,887	3,445	1,687	1,650	1,865	1,555	1,689
14	4,501	3,854	4,054	3,284	3,923	1,462	1,321	1,746	1,415	1,486
15	3,133	3,257	3,100	4,128	3,405	1,491	1,486	1,414	1,353	1,436
16	3,597	3,564	3,057	3,634	3,463	1,429	1,075	1,188	1,643	1,334
17	2,846	4,510	4,012	2,894	3,566	1,417	1,285	1,339	1,563	1,401
18	3,026	3,854	4,065	4,685	3,908	1,337	1,190	1,524	1,620	1,418
19	5,272	4,250	3,645	3,502	4,167	1,503	1,575	1,560	1,948	1,647
20	3,911	4,050	3,650	3,995	3,902	1,387	1,398	1,522	1,620	1,482
21	2,565	3,541	2,981	3,819	3,227	1,623	1,287	1,534	1,118	1,391

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_a (μm) - apalpador ótico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	1,67	1,86	2,13	1,90	1,89	1,66	1,71	1,67	1,46	1,63
2	1,44	1,92	1,54	1,80	1,68	1,70	1,88	2,09	1,64	1,83
3	1,78	1,71	1,94	1,75	1,80	1,77	1,57	1,83	1,58	1,69
4	1,62	1,82	1,73	1,73	1,73	1,88	1,44	1,72	1,69	1,68
5	1,59	1,88	1,70	1,52	1,67	1,64	1,73	1,67	1,66	1,68
6	1,99	1,80	1,84	1,80	1,86	1,64	1,09	2,02	1,53	1,57
7	1,87	1,60	1,84	1,60	1,73	1,45	1,76	1,81	1,45	1,62
8	1,89	1,75	1,68	1,80	1,78	1,90	1,64	1,56	1,59	1,67
9	1,57	1,54	1,71	1,73	1,64	1,76	1,63	1,71	1,89	1,75
10	1,70	1,79	2,17	2,15	1,95	1,65	1,66	1,60	1,71	1,66
11	1,63	1,77	1,63	1,91	1,74	2,09	2,06	1,93	1,71	1,95
12	1,77	1,60	1,96	1,58	1,73	1,48	1,27	1,84	1,26	1,46
14	1,90	1,93	1,67	1,90	1,85	1,68	1,39	1,54	1,49	1,53
15	1,72	1,74	1,69	1,81	1,74	1,80	1,53	1,83	1,71	1,72
16	1,72	1,74	1,96	1,77	1,80	2,02	1,54	2,67	1,48	1,93
17	2,17	1,91	2,51	1,94	2,13	1,70	2,12	1,67	1,62	1,78
18	2,03	1,85	1,91	9,61	3,85	1,75	1,58	1,74	2,32	1,85
19	1,91	1,69	1,87	1,69	1,79	2,03	2,07	2,21	1,62	1,98
20	1,79	1,70	1,62	2,02	1,78	1,72	1,82	1,73	1,75	1,76
21	1,90	2,08	1,64	1,72	1,84	1,83	1,86	1,67	1,55	1,73

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	0,92	0,90	0,93	1,00	0,94	1,01	0,74	0,76	0,68	0,80
2	1,14	1,14	1,23	0,95	1,12	0,80	1,00	1,21	0,79	0,95
3	1,03	0,95	0,97	1,11	1,02	0,70	1,04	1,50	0,68	0,98
4	1,00	0,90	1,05	1,01	0,99	0,71	0,84	1,06	0,74	0,84
5	1,04	0,76	1,14	1,14	1,02	0,85	0,79	0,85	0,69	0,80
6	1,15	0,95	0,94	1,07	1,03	0,70	0,96	0,67	1,05	0,85
7	0,92	0,93	0,88	1,16	0,97	0,65	0,76	0,72	0,79	0,73
8	0,90	1,08	1,16	0,95	1,02	0,84	0,74	0,80	0,72	0,78
9	1,07	1,13	1,07	1,06	1,08	1,07	0,73	0,71	0,78	0,82
10	1,18	1,05	1,03	0,96	1,06	0,82	0,70	0,85	0,77	0,79
11	1,04	1,11	1,05	1,10	1,08	0,83	0,69	0,78	0,72	0,76
12	0,99	0,89	1,08	1,08	1,01	0,79	0,75	1,07	0,75	0,84
14	1,13	1,04	0,98	1,16	1,08	0,76	0,85	0,86	0,71	0,80
15	1,02	0,91	0,99	1,04	0,99	0,70	0,76	0,86	0,85	0,79
16	0,90	0,89	1,00	0,83	0,91	0,75	0,70	0,98	0,84	0,82
17	0,89	1,05	0,93	0,95	0,96	0,89	0,66	0,72	0,92	0,80
18	1,36	1,11	1,04	1,01	1,13	0,95	0,84	0,79	0,74	0,83
19	0,99	0,89	1,01	0,96	0,96	1,00	0,76	0,73	0,90	0,85
20	0,91	1,16	1,47	1,02	1,14	0,68	1,10	0,98	0,68	0,86
21	1,02	1,44	1,00	1,02	1,12	1,28	0,77	0,69	0,86	0,90

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_z (μm) - apalpador ótico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	13,32	12,95	15,54	13,14	13,74	14,66	11,17	11,33	11,78	12,24
2	12,32	14,58	10,56	14,45	12,98	15,46	14,59	15,30	16,54	15,47
3	11,57	12,52	16,63	14,04	13,69	18,62	11,03	13,94	11,01	13,65
4	12,68	13,20	13,37	11,87	12,78	14,50	11,05	12,99	13,86	13,10
5	12,55	12,81	12,16	10,76	12,07	12,86	14,80	12,97	12,37	13,25
6	14,50	13,12	16,36	12,08	14,02	12,71	9,86	16,12	11,35	12,51
7	15,19	13,91	13,18	12,19	13,62	11,24	15,11	11,63	12,46	12,61
8	11,35	11,75	12,65	13,85	12,40	14,41	11,19	11,98	13,07	12,66
9	12,05	10,89	11,99	12,43	11,84	11,70	11,80	12,61	18,43	13,64
10	14,79	14,67	17,12	17,69	16,07	19,52	12,76	14,07	11,47	14,46
11	11,73	13,69	11,85	13,19	12,62	20,14	15,24	18,63	14,58	17,15
12	13,55	12,47	15,88	13,65	13,89	11,39	9,90	14,91	10,43	11,66
14	13,07	15,03	12,49	13,05	13,41	15,73	11,07	14,62	10,80	13,06
15	14,77	11,53	13,92	14,48	13,68	13,88	12,11	14,42	15,43	13,96
16	14,66	12,17	17,38	14,94	14,79	17,07	11,57	17,17	13,22	14,76
17	12,77	13,59	19,09	14,30	14,94	13,74	16,61	12,09	14,74	14,30
18	14,38	14,69	13,88	14,87	14,46	15,24	16,30	16,74	23,64	17,98
19	14,60	12,92	13,20	13,95	13,67	16,93	20,76	18,99	15,25	17,98
20	14,26	12,90	11,57	16,22	13,74	14,37	16,97	14,05	16,99	15,60
21	13,87	16,46	13,55	10,84	13,68	14,76	13,36	15,53	16,41	15,02

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	8,66	8,72	8,72	8,18	8,57	9,05	7,05	7,03	5,78	7,23
2	10,72	11,05	10,80	8,83	10,35	7,07	11,02	11,29	7,62	9,25
3	10,38	8,11	9,71	9,72	9,48	5,89	11,67	17,15	5,88	10,15
4	9,22	7,44	9,10	8,42	8,55	5,56	9,86	11,77	6,03	8,31
5	8,53	9,61	8,54	9,48	9,04	10,98	9,35	8,20	5,28	8,45
6	11,29	7,18	7,84	9,42	8,93	5,58	11,71	5,32	11,91	8,63
7	8,21	7,12	7,21	12,35	8,72	5,00	7,13	6,24	10,04	7,10
8	7,34	11,14	13,14	7,52	9,79	11,13	6,45	8,10	7,92	8,40
9	9,65	10,55	9,40	8,89	9,62	12,38	6,01	6,05	7,72	8,04
10	10,30	10,19	7,76	7,36	8,90	9,54	6,18	7,63	7,66	7,75
11	8,75	8,59	7,57	8,26	8,29	7,49	7,31	8,42	7,27	7,62
12	8,74	10,02	7,39	9,70	8,96	6,99	5,88	12,27	7,07	8,05
14	9,76	9,74	9,11	10,32	9,73	6,68	8,42	8,33	6,77	7,55
15	9,52	7,90	9,09	7,82	8,58	5,66	6,28	8,98	9,93	7,71
16	7,50	9,00	7,26	6,30	7,52	6,26	6,23	11,14	8,58	8,05
17	8,28	8,67	7,03	8,63	8,15	11,41	5,16	6,42	9,22	8,05
18	13,74	10,42	8,45	7,82	10,11	9,31	9,11	6,90	6,23	7,89
19	9,03	7,28	9,32	9,63	8,82	11,44	5,97	6,55	11,67	8,91
20	7,42	10,26	12,90	10,86	10,36	5,94	13,68	10,21	5,75	8,90
21	8,21	14,19	8,46	9,06	9,98	15,36	6,57	6,34	9,52	9,45

Comprovação estatística dos resultados

Medidas realizadas nos corpos de prova para - comprovação estatística do resultado do brunimento

Rugosidade R_{max} (μm) - apalpador ótico

Peça	Alargamento					Brunimento de desbaste - D150				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	20,61	16,67	20,69	16,16	18,53	22,10	14,02	12,92	14,96	16,00
2	15,68	19,15	11,67	15,40	15,48	19,71	18,55	18,03	26,12	20,60
3	12,89	16,83	21,97	17,31	17,25	27,05	12,57	21,39	14,35	18,84
4	16,27	15,27	15,51	13,04	15,02	19,08	15,38	17,80	18,84	17,78
5	14,45	13,89	15,09	14,28	14,43	18,68	16,71	14,48	17,22	16,77
6	19,95	15,06	27,58	15,91	19,63	15,63	12,13	20,13	14,71	15,65
7	23,85	18,89	20,96	14,40	19,53	12,53	21,45	13,03	16,83	15,96
8	12,16	14,43	14,75	18,64	15,00	23,07	13,63	13,84	15,29	16,46
9	17,37	13,29	13,61	15,43	14,93	15,40	14,47	14,61	22,63	16,78
10	21,39	18,83	29,33	31,08	25,16	22,10	17,35	20,84	15,32	18,90
11	13,21	15,37	17,09	16,92	15,65	31,86	22,29	28,77	15,42	24,59
12	15,79	14,17	22,13	16,01	17,03	17,41	14,20	15,88	14,77	15,57
14	19,30	20,59	13,90	15,75	17,39	24,46	13,73	22,16	13,19	18,39
15	17,50	14,03	16,64	16,94	16,28	18,27	12,11	17,33	22,07	17,45
16	24,58	14,32	25,90	20,13	21,23	28,32	17,41	19,14	21,77	21,66
17	15,26	15,74	27,00	18,15	19,04	17,73	23,70	14,43	23,29	19,79
18	17,95	18,14	17,44	21,37	18,73	19,78	25,94	20,13	25,14	22,75
19	17,43	18,26	19,16	18,68	18,38	27,50	24,12	24,85	17,35	23,46
20	20,76	16,62	14,37	26,80	19,64	23,05	26,19	22,26	19,17	22,67
21	17,01	25,05	18,71	12,13	18,23	21,68	17,41	21,06	25,05	21,30

Peça	Brunimento de semi-acabam. - D50					Brunimento de acabamento - D30				
	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média	Ø1	Ø2	Ø3	Ø4	Média
1	11,83	10,90	12,10	11,98	11,70	14,34	9,42	9,17	6,84	9,94
2	12,50	13,12	14,16	11,92	12,93	8,98	14,21	13,78	10,68	11,91
3	12,42	12,73	12,47	11,87	12,37	8,03	17,21	19,15	9,72	13,53
4	11,64	9,01	10,72	11,72	10,77	6,47	17,45	14,48	7,52	11,48
5	12,81	16,34	11,85	11,83	13,21	17,82	13,65	11,17	6,00	12,16
6	20,73	8,56	10,31	16,94	14,14	7,52	13,69	6,20	15,34	10,69
7	11,30	8,64	10,92	18,49	12,34	5,67	10,40	7,64	17,77	10,37
8	9,02	15,03	21,92	8,77	13,69	17,90	7,91	9,19	10,79	11,45
9	13,68	14,71	12,52	10,01	12,73	16,00	7,42	1,37	12,79	9,40
10	18,75	16,42	10,01	8,14	13,33	12,67	8,14	9,59	11,39	10,45
11	14,06	13,60	9,71	13,04	12,60	9,45	8,84	9,86	8,75	9,23
12	12,43	12,29	9,78	14,07	12,14	8,94	7,02	18,02	9,85	10,96
14	13,96	14,06	12,37	14,01	13,60	7,65	10,63	11,22	9,59	9,77
15	11,31	9,20	12,02	9,51	10,51	6,68	6,74	12,15	11,01	9,15
16	9,55	12,74	11,60	7,02	10,23	8,87	8,30	15,10	12,36	11,16
17	9,82	11,07	9,21	12,47	10,64	13,11	6,36	8,26	10,88	9,65
18	19,81	12,37	9,65	9,27	12,78	11,57	11,82	8,26	7,89	9,89
19	9,80	8,32	10,84	10,77	9,93	12,25	7,55	7,93	13,15	10,22
20	8,39	12,25	19,96	10,86	12,87	6,92	15,17	14,18	7,69	10,99
21	11,50	17,04	11,13	12,96	13,16	17,46	7,05	8,07	12,14	11,18