

GUILHERME HENRIQUE CAETANO BARROS

**BRUNIMENTO FLEXÍVEL DE CILINDROS DE
BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS:
AVALIAÇÃO DO EFEITO DA GRANULOMETRIA E
DO NÚMERO DE GOLPES DA FERRAMENTA NA
RUGOSIDADE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

GUILHERME HENRIQUE CAETANO BARROS

**BRUNIMENTO FLEXÍVEL DE CILINDROS DE BLOCOS DE
COMPRESSORES HERMÉTICOS: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA
GRANULOMETRIA E DO NÚMERO DE GOLPES DA FERRAMENTA
NA RUGOSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Co-orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B277b Barros, Guilherme Henrique Caetano, 1989-
2018 Brunitamento flexível de cilindros de blocos de compressores
herméticos: avaliação do efeito da granulometria e do número de golpes
da ferramenta na rugosidade / Guilherme Henrique Caetano Barros. -
2018.
157 f. : il.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.
Coorientador: Luciano José Arantes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1156>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3.
Compressores - Teses. I. Valdés Arencibia, Rosenda. II. Arantes,
Luciano José, 1974- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ALUNO: Guilherme Henrique Caetano Barros

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11622EMC009

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

LINHA DE PESQUISA: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Brunimento Flexível de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos: Avaliação do Efeito da Granulometria e do Número de Golpes da Ferramenta na Rugosidade”

ORIENTADORA: Profa. Dr. Rosenda Valdés Arencibia

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Luciano José Arantes

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala de Reuniões do LTAD do Bloco 5F, Campus Santa Mônica, em 29 de junho de 2018, às 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME

ASSINATURA

Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

UFU

Prof. Dr. Luciano José Arantes

UFU

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva

UFU

Prof. Dr. Antonio Piratelli-Filho

UnB

Uberlândia, 29 de junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio e ajuda de todos, que de qualquer forma contribuíram para que o sonho de me tornar mestre pudesse ser concretizado, e a possibilidade de realizar o presente trabalho, destacando-se:

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso de pós-graduação.

À EMBRACO S/A (Whirlpool – Unidade Compressores) pelo fornecimento do material e pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

À Profa. Dra Rosenda Valdés Arencibia e ao Prof. Dr. Luciano José Arantes pelo tempo desprendido para passar valiosos ensinamentos, pela paciência e pela disposição para que o trabalho fosse realizado com êxito.

Aos colegas José Eduardo Leal e Leandro Carvalho Pereira pela contribuição no trabalho desenvolvido.

Aos professores Dr. Márcio Bacci da Silva e Dr. Éder Silva Costa que destinaram parte de seu tempo para participarem desta pesquisa.

Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Patos de Minas pelo incentivo a minha qualificação.

À minha estimada família, por estar presente em todos os momentos da minha vida, principalmente: a minha querida mãe Leila pelo amor incondicional e sempre dedicação, ao meu pai Godinho “*in memorian*” que sempre acreditou em mim e incentivou a busca de mais conhecimento. Aos meus irmãos Frederico e Leonardo sempre presentes nessa caminhada.

Barros, G. H. C. **Brunimento Flexível de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos: Avaliação do Efeito da Granulometria e do Número de Golpes da Ferramenta na Rugosidade**, 2018. 157 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar por meio de um planejamento fatorial completo (2^1 e 3^1) o efeito das condições de usinagem granulometria e número de golpes da ferramenta empregados durante o processo de brunimento flexível, na qualidade microgeométrica do cilindro de blocos de compressores herméticos, especificadamente na rugosidade (R_a , R_q , R_p , R_t , R_v , R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} e CV). O fator granulometria foi investigado em dois níveis (400 e 800 *mesh*) e o número de golpes da ferramenta em três (1, 3 e 5). O brunimento flexível foi aplicado em cilindros de blocos de compressores herméticos previamente usinados pelo brunimento convencional na linha de produção da EMBRACO. O brunimento flexível foi realizado na UFU utilizando uma fresadora CNC e as ferramentas brunidoras flexíveis. A avaliação da qualidade geométrica foi efetuada por meio da medição da rugosidade utilizando um rugosímetro eletromecânico. Para cada mensurando foi estimada sua respectiva incerteza de medição, aplicando o método GUM. A granulometria da ferramenta afetou de forma estatisticamente significativa os valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_{pk} , R_k e M_{r2} , enquanto que o número de golpes afetou os parâmetros R_a e R_{pk} . Já a interação entre estes fatores afetou os parâmetros R_a , R_q , R_p e R_k . Os resultados indicaram que o processo de brunimento flexível utilizando a ferramenta com granulometria de 800 *mesh* e 5 golpes desta proporcionou o melhor acabamento superficial considerado a funcionalidade dos cilindros. A aplicação destas condições de corte permitiu a obtenção de superfícies muito similares às resultantes do brunimento platô, o que pode aumentar o campo de aplicação deste processo. O brunimento flexível utilizando a ferramenta com granulometria de 800 *mesh* e 1 golpe possibilitou obter um acabamento similar ao atingido com a ferramenta com granulometria de 400 *mesh* e 3 golpe, diminuindo o tempo de usinagem.

Palavras Chave: Brunimento Convencional. ANOVA, Coeficiente de vazio

Barros, G. H. C. **Flexible honing of crankcase cylinder of hermetic compressors: Effect Evaluation of Tool Grain Size and Strokes Numbers in Roughness**, 2018. 157 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the effect of the two cutting parameters (grain size and number of tool strokes) on the values of roughness (R_a , R_q , R_p , R_t , R_v , R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_r1 , M_r2 and CV) in flexible honed crankcase cylinder of hermetic compressors. The study was based on a full factorial design $2^1 \times 3^1$, where the grain size factor was investigated in two levels (400 and 800 *mesh*) and the number of tool strokes in three (1, 3 and 5). The flexible honing process was carried out to cylinders previously machined by the conventional honing in the production line of EMBRACO. The flexible honing was conducted at UFU using a CNC milling machine and the Silicon Carbide flex hone tools. An electromechanical surface roughness tester was used to carry out roughness measurements. The measurement uncertainty was assessed using the GUM method. The Analysis of Variance (ANOVA) technique was applied, and it was observed that the factor tool grain size caused statistically significant effects on R_a , R_q , R_p , R_{pk} , R_k and M_r2 , while the number of strokes affected the parameters R_a and R_{pk} . The interaction between these factors affected the parameters R_a , R_q , R_p and R_k . The results indicated that the flexible honing process using 800 *mesh* tool grain size and 5 strokes gave the best surface finish considering the functionality of the cylinders. The application of these cutting conditions allowed the obtaining of surfaces very similar to the ones resulting from the plateau honing process, which can increase the field of application of this process. The flexible honing using the 800 *mesh* tool grain size and 1 stroke allowed obtaining a finish similar to that achieved with the 400 *mesh* tool grain size and 3 strokes, reducing the machining time.

LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 1.1(a) - Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (VERTEC, 2017).....</p> <p>Figura 1.2 - Perfil efetivo referente ao cilindro do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível (PEREIRA, 2016).....</p> <p>Figura 2.1 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético (RECABARREN, 2007)</p> <p>Figura 2.2 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético foto real (SOTOMAYOR, 2013).....</p> <p>Figura 2.3 - Princípio funcionamento compressor hermético alternativo (KOERICH, 2004).....</p> <p>Figura 2.4 - Brunidor do tipo precidor utilizado no brunimento de blocos de compressores herméticos (BRUNITEC, 2017).....</p> <p>Figura 2.5 - Valores de rugosidade média (R_a) para algumas operações de usinagem (AARON et al., 1995).....</p> <p>Figura 2.6 - Valores de rugosidade R_k, R_{pk} e R_{vk} para os diferentes processos de acabamento de superfície (JOCSAK et al, 2005).....</p> <p>Figura 2.7 - Movimento da ferramenta e marcas hachuradas na superfície da peça....</p> <p>Figura 2.8 - Grandezas de entrada características do processo de brunimento. Baseado em (KÖNIG, 1980).....</p> <p>Figura 2.9 - Partes constituintes de uma ferramenta de brunir (WEIGMANN, 2005b).....</p> <p>Figura 2.10 - Codificação das características de segmentos abrasivos de brunimento, de acordo com os fabricantes (a) Nagel e (b) Gehring (NAGEL, 1990; GEHRING, 2003).....</p>	<p>5</p> <p>7</p> <p>10</p> <p>11</p> <p>12</p> <p>13</p> <p>15</p> <p>16</p> <p>17</p> <p>18</p> <p>20</p> <p>20</p>
--	---

Figura 2.11 - Exemplos de grãos superabrasivos: (a) diamante natural; (b) diamante sintético; (c) CBN (NAGEL, 1990).....	21
Figura 2.12 - Evolução da rugosidade da peça ao longo do processo de usinagem para o brunimento platô (NAGEL, 1990).....	22
Figura 2.13 - Classificação dos fluidos de corte conforme DIN 51385 (apud KLEBER, 2000).....	26
Figura 2.14 - Diagrama de escolha do fluido de corte em função do material da peça (NAGEL, 1998b).....	27
Figura 2.15 - Velocidades presentes no brunimento de curso longo convencional e formação do ângulo de cruzamento (KÖNIG, 1989).....	29
Figura 2.16 - Ferramenta brunidora flexível tipo esferas (BRM, 2015).....	31
Figura 2.17 - Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2016).....	32
Figura 2.18 - Composição da superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002).....	34
Figura 2.19 - Marcas feitas pela ferramenta na superfície (TAYLOR HOBSON).....	34
Figura 2.20 - Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).....	35
Figura 2.21 - Altura máxima do pico do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	37
Figura 2.22 - Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	38
Figura 2.23 - Altura total do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	38
Figura 2.24 - Curva de <i>Abbott Firestone</i> (TAYLOR HOBSON, 2000).....	39
Figura 2.25 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994). Modificada.....	42
Figura 2.26 - Distribuição normal.....	46
Figura 2.27 - Distribuição retangular (BIPM et al, 2008a). Modificada.....	47
Figura 2.28 - Distribuição triangular (BIPM et al, 2008a). Modificada.....	48
Figura 2.29 - Representação de um modelo geral de processo.....	52
Figura 3.1 - Representação esquemática do número de golpes da ferramenta utilizados no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores (PEREIRA et al., 2018) Modificada.....	60
Figura 3.2 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson, termohigrômetro HT260 da Instrutherm e bloco posicionados no desempenho da MMC.....	62

Figura 3.3 - Um bloco fixado na mesa da MMC durante a medição da rugosidade do cilindro.....	63
Figura 3.4 - Desenho do bloco do compressor hermético (EMBRACO, 2016) com a indicação da base deste.....	64
Figura 3.5 - Centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2016).....	68
Figura 3.6 - Brunidores flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria (a) 400 <i>mesh</i> e (b) 800 <i>mesh</i>	69
Figura 3.7 - (a) Dispositivo utilizado para fixação do bloco no centro de usinagem CNC durante a realização do brunimento flexível (FERNANDES, 2014) e (b) furos do bloco do compressor utilizados para fixação no dispositivo.....	70
Figura 3.8 - Fixação do dispositivo e bloco na máquina CNC.....	71
Figura 3.9 - Sistema de usinagem brunimento flexível.....	71
Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro <i>Ra</i> para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	73
Figura 4.2 - Diferença entre os valores médios de <i>Ra</i> obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.....	73
Figura 4.3 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro <i>Ra</i> de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	76
Figura 4.4 - Valores médios do parâmetro <i>Rq</i> para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	77
Figura 4.5 - Diferença entre os valores médios de <i>Rq</i> obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.....	78
Figura 4.6 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro <i>Rp</i> de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	79
Figura 4.7 - Valores médios do parâmetro <i>Rp</i> para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	80
Figura 4.8 - Perfis efetivos referentes ao cilindro do bloco 26 (a) usinado pelo brunimento convencional e (b) após o brunimento flexível.....	81
Figura 4.9 - Diferença entre os valores médios de <i>Rp</i> obtidos antes e após o	

brunimento flexível para cada experimento.....	82
Figura 4.10 - Perfis efetivos referentes aos cilindros usinados pelo BC+BF em diferentes condições e os valores médios de cinco medições obtidos para cada bloco.....	84
Figura 4.11 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rp de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	85
Figura 4.12 - Valores médios do parâmetro Rv para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	86
Figura 4.13 - Diferença entre os valores médios de Rv obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.....	87
Figura 4.14 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rv de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	88
Figura 4.15 - Valores médios do parâmetro Rt para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	89
Figura 4.16 - Diferença entre os valores médios de Rt obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.....	90
Figura 4.17 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	91
Figura 4.18 - Valores médios para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %) dos parâmetros (a) Rpk , (b) Rk e (c) Rvk	92
Figura 4.19 - Valores médios dos parâmetros $Mr1$ e $Mr2$ para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	94
Figura 4.20 - Curvas de <i>Abbott Firestone</i> referente ao cilindro do bloco 30 (a) após brunimento convencional e (b) após o Experimento 1 de brunimento flexível.....	96
Figura 4.21 - Curvas de <i>Abbott Firestone</i> referente ao cilindro do bloco 2 (a) após brunimento convencional e (b) após Experimento 2 de brunimento flexível.....	98
Figura 4.22 - Curvas de <i>Abbott Firestone</i> referente ao cilindro do bloco 15 (a) após brunimento convencional e (b) após Experimento 6 de brunimento flexível.....	100
Figura 4.23 - Diferença entre os valores médios obtidos antes e após o brunimento	

flexível para cada experimento dos parâmetros (a) Rpk , (b) Rk e (c) Rvk	102
Figura 4.24 - Diferença entre os valores médios obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento dos parâmetros (a) $Mr1$ e (b) $Mr2$	104
Figura 4.25 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença dos parâmetros (a) Rpk , (b) Rk e (c) Rvk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	106
Figura 4.26 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença dos parâmetros (a) $Mr1$ e (b) $Mr2$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	107
Figura 4.27 - Valores médios do parâmetro Rp/Rt para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).....	109
Figura 4.28 - Diferença entre os valores médios de Rp/Rt obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.....	109
Figura 4.29 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro CV de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre as normas FEPA e DIN.....	23
Tabela 2.2 - Características físicas de óleo mineral integral e água (BOOR, 1989a)...	25
Tabela 2.3 - Recomendação dos abrasivos em relação aos materiais a serem brunidos (VERTEC, 2016).....	32
Tabela 2.4 - Comprimentos de amostragem (ABNT NBR ISO 4288 (2008)).....	41
Tabela 2.5 - Comprimentos de amostragem para perfis periódicos (ABNT NBR ISO 4288 (2008)).....	42
Tabela 2.6 - Quadro de ANOVA.....	56
Tabela 3.1 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo 2^1 e 3^1	59
Tabela 3.2 - Parâmetros de corte para brunimento convencional (FERNANDES, 2014).....	61
Tabela 3.3 - Tipo de avaliação da incerteza (TA), tipo de distribuição de probabilidades (DP), equação da incerteza padrão, graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) adotados para cada variável de influência na avaliação da incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_t , R_{vk} , R_{pk} , R_k , Mr_1 e Mr_2	67
Tabela 3.4 - Tipo de avaliação da incerteza (TA), tipo de distribuição de probabilidades (DP), equação da incerteza padrão, graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) adotados para cada variável de influência na avaliação da incerteza associada à medição do parâmetro de rugosidade CV	67
Tabela 3.5 - Especificações das condições do brunimento flexível (PEREIRA, 2016).....	69
Tabela 3.6 - Especificações da ferramenta brunidora flexível (VERTEC, 2016).....	69
Tabela 4.1 - Resultados da avaliação da incerteza do parâmetro R_a para o cilindro 6 e experimento 4 usinado pelo brunimento flexível.....	74

Tabela 4.2 - ANOVA da diferença do parâmetro Ra de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	75
Tabela 4.3 - ANOVA da diferença do parâmetro Rq de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	78
Tabela 4.4 - ANOVA da diferença do parâmetro Rp de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	83
Tabela 4.5 - ANOVA da diferença do parâmetro Rv de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	87
Tabela 4.6 - ANOVA da diferença do parâmetro Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	90
Tabela 4.7 - ANOVA da diferença do parâmetro Rpk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	105
Tabela 4.8 - ANOVA da diferença do parâmetro Rk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	105
Tabela 4.9 - ANOVA da diferença do parâmetro Rvk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	105
Tabela 4.10 - ANOVA da diferença do parâmetro $Mr1$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	107
Tabela 4.11 - ANOVA da diferença do parâmetro $Mr2$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	107
Tabela 4.12 - ANOVA da diferença do parâmetro Rp/Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.....	110
Tabela 4.13 - Resultados da avaliação da incerteza CV para o cilindro 1 e Experimento 2 usinado pelo brunimento flexível.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Y : Variável de Saída

\bar{x}_i : Estimativa da variável X_i

\bar{y} : Estimativa da variável Y

f : Função matemática que engloba todas as variáveis do processo de medição

ν_{eff} : Grau de liberdade efetivo

X_i : Variáveis de entrada

μ : Média de uma distribuição normal

a : Metade do comprimento da base de um retângulo ou de um triângulo

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA: Análise de Variância

A_R : Raio da ponta do apalpador

BC: Brunimento Convencional

BC+BF: Brunimento convencional mais brunimento flexível

BF: Brunimento Flexível

BIPM: *Bureau International de Pesos e Medidas*

CBN: Nitreto de Boro Cúbico

CEP: Controle estatístico de processos

$c_i(x_i)$: Coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada (x_i)

CNC: Controle Numérico Computadorizado

CS: Coeficiente de sensibilidade

CV: Coeficiente de vazio

D : Deformação da amostra durante a medição

d_c : Diâmetro interno do cilindro

DP: Tipo de distribuição de probabilidades

Embraco: *S/A Whirlpool - Unidade Compressores*

- EUA: Estados Unidos da América
- F: Razão entre os quadrados médios
- Fe_3C : Fórmula da Cementita
- FEPA: Federação Europeia dos Fabricantes de Abrasivos
- FV: Fonte de variação
- GL: Grau de liberdade
- GLT : Número total de graus de liberdade
- GR x NG: Interação entre os fatores granulometria da ferramenta e número de golpes
- GR: Granulometria da ferramenta
- GUM: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
- H_0 : Hipótese Nula
- H_1 : Hipótese alternativa
- IC_{Rug} : Incerteza associada à calibração do rugosímetro
- INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- ISO: *International Organization for Standardization*
- k : fator de abrangência
- le : *cut-off*;
- LEMETRO: Laboratório de Ensino em Metrologia
- LEPU: Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem
- lm : comprimento do percurso de medição
- ln : comprimento para parada do apalpador
- lr : comprimento de amostragem
- lt : comprimento total de medição
- lv : comprimento para atingir a velocidade de medição
- MMC: Máquina de medir por coordenadas
- $Mr1$: Fração de contato mínimo no núcleo do perfil de rugosidade
- $Mr2$: Fração de contato máximo no núcleo do perfil de rugosidade
- n : número de elementos da amostra
- NG: Número de Golpes
- n_r : Rotação do cabeçote brunidor
- p : Probabilidade
- QM: Quadrado médio
- $r(x_i, x_j)$: coeficiente de correlação entre as estimativas (x_i) e (x_j)

Ra: Desvio aritmético médio do perfil

RC: Rockwell C

Rk: Rugosidade do núcleo do perfil

Rku: Fator de achatamento do perfil (*Kurtosis*)

Rp: Altura máxima do pico do perfil

Rpk: Região de pico

Rq: Desvio médio quadrático do perfil

R_{Rug}: Resolução do rugosímetro

Rsk: Fator de assimetria do perfil (*Skewness*)

RSm: Largura média dos elementos do perfil de rugosidade

Rt: Altura total do perfil

Rv: Profundidade máxima do vale do perfil

Rvk: Região de vale

Rz: Altura máxima do perfil

s: desvio-padrão experimental;

SiC: Carboneto de Silício

SQ: Soma de quadrado

SQT: Soma de quadrados total

TA: Tipo de avaliação da incerteza

U(Cal.): incerteza expandida declarada no certificado de calibração

u(x): Incerteza padrão da variável *x*

U(y): Incerteza expandida relativa à variável de saída *y*

u_c(y): incerteza-padrão combinada da variável de saída

u_c(y): Incerteza-padrão combinada da variável de saída *y*

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

V: Variável amplitude da vibração mecânica

V_c: velocidade de corte resultante

V_{ca}: velocidade axial

V_{ct}: velocidade tangencial

Vo: Volume de retenção de óleo

$\bar{x}(L_{cv})$: Média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro *CV*;

$\bar{x}(L_{Rug})$: Média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro;

$\bar{x}(L_{Rug})$: Variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro

x_i : Estimativa da variável X_i

$Z(x)$: Ordenadas dos pontos do perfil de rugosidade medidas a partir da linha média

z_n : Variáveis não controláveis

α : Ângulo de Cruzamento

ΔA_R : Correção associada ao raio da ponta do apalpador

ΔD : Correção associada à deformação do material durante a medição

ΔIC_{Rug} : Correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro

ΔR_{Rug} : Correção associada à resolução do rugosímetro

ΔT : Afastamento da temperatura com relação a 20 °C

ΔRp : Correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rp

ΔRt : Correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rt

δT : Variação da temperatura durante a medição

σ^2 : Variância populacional

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INDRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1- Compressor recíproco alternativo herméticos.....	9
2.1.1. <i>Funcionamento compressor recíproco alternativo hermético</i>	11
2.1.2. <i>Cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético</i>	13
2.2- Usinagem por abrasão	14
2.2.1. <i>Brunimento</i>	15
2.2.2. <i>Brunimento Convencional</i>	19
2.2.3. <i>Material dos grãos abrasivos</i>	21
2.2.4. <i>Tamanho de grão do abrasivo</i>	22
2.2.5. <i>Fluidos de corte</i>	24
2.2.6. <i>Ligantes</i>	28
2.2.7. <i>Cinemática</i>	29
2.2.8- <i>Brunimento Flexível</i>	30
2.3. Rugosidade	33
2.3.1. <i>Métodos para medição de Rugosidade.....</i>	35
2.3.2. <i>Parâmetros de Rugosidade.....</i>	36
2.3.3. <i>Critérios para avaliar a rugosidade</i>	41
2.4. Incerteza de medição	43
2.4.1. <i>Definição do mensurando</i>	44
2.4.2. <i>Identificação das grandezas de influência</i>	44
2.4.3. <i>Obtenção do modelo matemático.....</i>	44
2.4.4. <i>Avaliação da incerteza-padrão</i>	45
2.4.5. <i>Avaliação da incerteza-padrão combinada</i>	49
2.4.6. <i>Avaliação da incerteza expandida</i>	50
2.4.7. <i>Apresentação do resultado de medição</i>	51

2.5. Planejamento de Experimentos	51
2.5.1. Princípios básicos do planejamento de experimentos	53
2.5.2. Roteiro experimental	53
2.5.3. Análise de Variância	54
CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	58
3.1. Planejamento dos experimentos	59
3.2. Brunitamento convencional	60
3.3. Avaliação da rugosidade do cilindro	61
3.3.1 Avaliação da incerteza de Medição	64
3.4. Brunitamento flexível	68
3.4.1. Sistema de fixação e alinhamento do cilindro	70
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1. Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade do cilindro (R_a)	72
4.2. Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade do cilindro (R_q)	76
4.3. Altura máxima do pico do perfil (R_p)	79
4.4. Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade (R_v)	85
4.5. Altura total do perfil de rugosidade (R_t)	88
4.6. Família R_k	91
4.7. Coeficiente de vazio (CV)	108
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	112
CAPÍTULO VI - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
APÊNDICES.....	123
APÊNDICE I - Desvio Aritmético Médio do Perfil (R_a)	123
APÊNDICE II - Desvio Médio Quadrático Do Perfil (R_q)	124
APÊNDICE III - Altura Máxima do Pico do Perfil (R_p)	125
APÊNDICE IV - Profundidade Máxima do Vale do Perfil (R_v)	126

APÊNDICE V - Altura Total do Perfil (R_t)	127
APÊNDICE VI - Fração de Contato Mínimo no Núcleo do Perfil de Rugosidade (Mr_1).....	128
APÊNDICE VII - Fração de Contato Máximo no Núcleo do Perfil de Rugosidade (Mr_2).....	129
APÊNDICE VIII - Rugosidade do Núcleo do Perfil (R_k)	130
APÊNDICE IX - Região de Pico (R_{pk})	131
APÊNDICE X - Região de Vale (R_{vk})	132
APÊNDICE XI - Coeficiente de Vazio (CV)	133
ANEXOS.....	134
ANEXO I - Certificado de Calibração do Termohigrômetro Digital	134
ANEXO II - Certificado de Calibração do Rugosímetro.....	136

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O século XXI, caracterizado por grandes descobertas e avanços científicos, bem como por um acelerado desenvolvimento tecnológico voltado para uma economia sustentável, trouxe a evolução dos processos produtivos. O caráter globalizado das relações comerciais, a concorrência e a busca constante por uma maior parcela no mercado nacional e internacional levaram os países a investirem com fôlego total na procura de novas tecnologias, com o claro objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos, e em contrapartida diminuir as despesas que envolvem o processo de produção. Com isso, máquinas modernas de usinagem foram incorporadas, gradativamente, ao mundo industrializado, onde os produtos são fabricados com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades, como consequência dos avanços tecnológicos (ROSA, 2012).

Na crescente busca do desenvolvimento e evolução de seus produtos a indústria de refrigeração e climatização, em particular a de produção de compressores, tem investido constantemente em pesquisas para melhorar a funcionalidade e prolongar a vida útil de seus componentes. Neste contexto, o cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético, tem recebido uma atenção especial por parte dos fabricantes e pesquisadores. Este requer elevada exatidão dimensional e geométrica, a fim de evitar dificuldades na montagem, o aparecimento de esforços desgastantes, possíveis vazamentos, e a perda de eficiência do compressor (ROSA, 2012), e com isso diminuir gastos com possíveis retrabalhos ou refugos devidos a erros de fabricação.

Uma iniciativa pioneira neste sentido foi proposta pela Embraco S/A (Whirlpool - Unidade Compressores), fabricante de compressores, que por meio da aplicação do processo de brunimento flexível utilizando-se a ferramenta *Flex-Hone* introduziu significativas

melhorias na rugosidade do cilindro do compressor contribuindo para a otimização do desempenho e o aumento da vida útil dos blocos de compressores herméticos.

A ideia por parte da empresa de efetuar uma operação de acabamento nos cilindros, com o objetivo de eliminar os picos isolados presentes na superfície, arredondar o cume da maior quantidade de picos e manter os vales com o intuito de evitar o contato metal-metal e garantir a vedação do sistema cilindro-pistão por meio do lubrificante. Além disso, a necessidade de gerar superfícies com uma topografia especial, principalmente quando sua aplicação está vinculada à solicitação por atrito, tem no brunimento uma das soluções mais adequadas, pois esse processo permite a retenção de uma camada superficial de lubrificante. Fator que melhora consideravelmente o comportamento de desgaste e também reduz os níveis de ruído produzido durante o trabalho. Para tanto, a empresa propôs a utilização do processo de usinagem de brunimento flexível utilizando-se a ferramenta *Flex-Hone*.

Todas estas características, aliadas aos grandes e crescentes avanços tecnológicos que se agregam ao brunimento desde o seu desenvolvimento, têm fortalecido e, cada dia mais, ampliado suas aplicações nos mais diferentes campos da indústria, principalmente na fabricação de componentes hidráulicos, elementos de motores e compressores, peças rotativas, etc.

Na literatura são apresentadas outras técnicas de brunimento que podem ser utilizadas para efetuar a operação de acabamento dos cilindros, entretanto elas são onerosas e demandam maior tempo quando comparadas ao brunimento flexível. Desta forma, este último se apresenta como uma boa alternativa para atender a elevada exatidão dimensional e geométrica do cilindro, de forma simples e econômica. As principais são: o brunimento por jato d'água (REJOWSKI, 2012), o brunimento platô (ANDRETTA, 2001; MACHADO, 2008; JUNIOR, 2009; PAWLUS, 2009; CORRAL, 2010; REJOWSKI, 2012), o brunimento por laser (ANDRETTA, 2001; REJOWSKI, 2012), o brunimento deslizante (REJOWSKI, 2012) e o brunimento espiral deslizante (REJOWSKI, 2012).

De forma semelhante ao que ocorre com os demais processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida, em relação ao brunimento existem poucas informações que compilem o conhecimento adquirido e acumulado sobre o assunto. O processo de brunimento flexível é mais um exemplo de conteúdo pouco estudado e pesquisado, apesar de conhecidas suas importantes características e vantagens no que diz respeito aos baixos custos envolvidos, à simplicidade de operação e à redução significativa da rugosidade.

Pawlus (1994, 1997) após analisar e avaliar um grande número de cilindros brunidos, obtidos por diferentes ferramentas abrasivas e tamanhos de grãos, concluiu que é possível fazer uma descrição clara e precisa de uma superfície de um cilindro brunido utilizando parâmetros como o coeficiente de vazio.

Os parâmetros de corte do brunimento flexível têm sido pouco investigados e consta-se atualmente com um acervo pouco significativo sobre este assunto. Fernandes (2014) avaliou a qualidade dimensional e geométrica de 14 cilindros de blocos de compressores herméticos antes e após a realização do brunimento flexível. Porém, uma vez que estes parâmetros permaneceram constantes durante o desenvolvimento do trabalho, este autor não avaliou os impactos de variáveis de processo, tais como: rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta, na rugosidade superficial e no desvio de circularidade e cilindricidade, sendo que alguns desses parâmetros serão investigados neste presente trabalho.

Em trabalho recente Pereira (2016) avaliou o efeito de três fatores (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta) nos valores de rugosidade (R_a , R_q , R_p , R_v , R_t , R_{sk} , R_{ku} , R_{vk} , R_{pk} , R_k , V_o e CV) de cilindros de blocos de compressores obtidos pelos processos de brunimento convencional e brunimento convencional mais o flexível. Para tanto foi proposto um planejamento fatorial completo $2 \times 2 \times 3$, onde a rotação foi investigada em dois níveis: 400 rpm e 700 rpm, a velocidade de avanço em dois níveis: 1400 mm/min e 2800 mm/min, e o número de golpes em três níveis: 1, 2 e 3 golpes. Este autor concluiu que para uma confiabilidade de 95 %, a variação dos parâmetros de usinagem (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta) no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores proporcionou efeitos estatisticamente significativos na maioria dos valores dos parâmetros de rugosidade avaliados. Ainda, observou que os valores dos parâmetros de corte: 3 golpes da ferramenta, 700 rpm e velocidade de avanço de 1400 mm/min, proporcionaram os melhores resultados nos parâmetros de rugosidade avaliados considerando a funcionalidade dos cilindros de compressores herméticos.

Neste contexto surgiu à proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal investigar o efeito dos fatores (granulometria da ferramenta e número de golpes) no acabamento superficial dos cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelo processo de brunimento flexível. Para tanto é proposto um planejamento fatorial completo $2^1 \times 3^1$ onde o fator granulometria da ferramenta será avaliado em dois níveis e o número de golpes em três.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo Principal*

Este trabalho tem como objetivo investigar o efeito dos fatores (granulometria da ferramenta e número de golpes) no acabamento superficial dos cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelo processo de brunimento flexível. Para tanto foi proposto um planejamento fatorial completo 2^1 e 3^1 onde o fator granulometria da ferramenta foi avaliado em dois níveis e o número de golpes em três.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Contribuir para o entendimento do processo de brunimento flexível, identificando suas vantagens e desvantagens;
- Fabricar componentes mecânicos com acabamentos superficiais mais próximos daqueles fornecidos pelo brunimento platô com custo significativamente inferior;
- Aumentar o campo de aplicação do brunimento flexível e fornecer embasamento teórico para futuras aplicações;
- Contribuir para a rastreabilidade dos resultados de medição.

1.2. Justificativa do trabalho

O brunimento flexível tem por finalidade eliminar os picos e imperfeições das superfícies dos cilindros dos compressores herméticos e melhorar expressivamente o acabamento superficial o qual influí diretamente na vida útil e na eficiência do compressor. A Figura 1.1 apresenta esquematicamente um perfil de uma superfície cilíndrica antes de realizar a operação de brunimento flexível e após a realização desta.

Outros tipos de brunimento podem ser utilizados para mesma finalidade, como por exemplo, o brunimento platô, que também gera um perfil de rugosidade similar ao obtido pelo brunimento flexível. Mas quando se comparam os custos envolvidos nesses dois tipos de brunimento, o brunimento flexível se destaca por possuir custo significativamente menor.

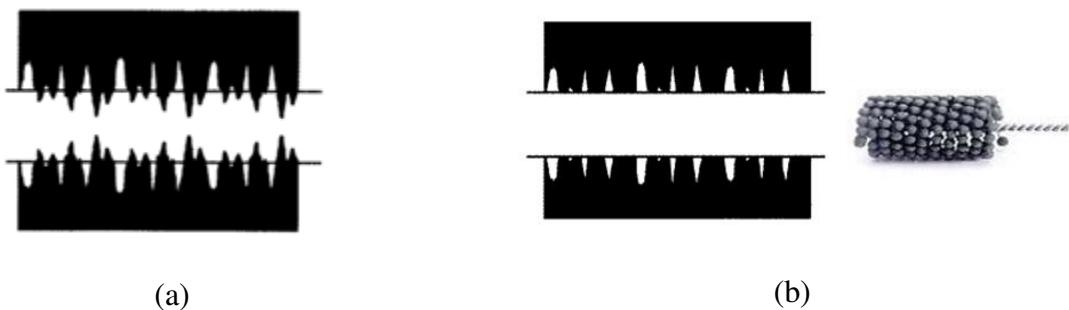


Figura 1.1 - (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (VERTEC, 2017).

Soma-se ao exposto que o processo de brunimento flexível não necessita de máquinas robustas e especiais para a sua realização, ao contrário dos outros tipos de brunimento de acabamento, como o brunimento por laser e brunimento por jato d'água, que requerem máquinas dedicadas, tornando o processo oneroso e mais caro. Em trabalho recente Fernandes (2014) utilizou uma máquina Fresadora CNC para a realização do brunimento flexível.

O brunimento flexível é uma operação de acabamento pouco investigada entre os pesquisadores atuantes na área de fabricação mecânica, e, portanto não foram encontrados muitos trabalhos na literatura que abordem este processo. Fernandes (2014) avaliou a qualidade geométrica e dimensional de 14 cilindros de blocos de compressores herméticos antes e após a realização do brunimento flexível. Porém, este autor não avaliou os impactos das variáveis de processo quais sejam: velocidade de corte, avanço, número de golpes, fluído refrigerante e granulometria da ferramenta, na rugosidade superficial e no desvio de circularidade, uma vez que foi adotado somente um valor para cada variável de processo. Ainda, este autor não avaliou o parâmetro da relação Rp/Rt (coeficiente de vazio) que fornecem informações valiosas sobre as superfícies brunidas, pois permite avaliar e quantificar a evolução do desgaste da superfície.

Assim, Pereira (2016) investigou o efeito de três parâmetros de corte (rotação, avanço e número de golpes da ferramenta) nos valores de rugosidade (Ra , Rk , Rpk , Rvk , e Rp/Rt) em cilindros de blocos de compressores herméticos. O fator “número de golpes da ferramenta” foi investigado em três níveis, a saber: um golpe (-1), dois golpes (0) e três golpes (+1). Este autor concluiu que o fator número de golpes da ferramenta provocou os maiores efeitos na rugosidade dos cilindros em todas as condições investigadas. Ainda, os valores dos parâmetros de corte: 3 golpes da ferramenta, rotação da ferramenta de 700 rpm e velocidade

de avanço de 1400 mm/min, proporcionaram os melhores resultados nos parâmetros de rugosidade avaliados, considerando a funcionalidade dos cilindros de compressores herméticos. Entretanto, estas condições ocasionaram maior tempo de usinagem que aquele gasto atualmente na EMBRACO, no qual é utilizado maior velocidade de avanço e três golpes da ferramenta. Desta forma, em uma linha de produção, a implementação dos resultados deste trabalho pode levar a uma diminuição da produtividade e maior gasto com ferramentas de corte (brunidor flexível), horas-máquina, energia elétrica, horas-operador, e fluido refrigerante.

Arantes *et al.*, (2017) efetuaram uma extensa avaliação da rugosidade de 14 cilindros de blocos de compressores herméticos obtidos pela aplicação do brunimento flexível após o convencional. Parâmetros de amplitude, parâmetros da família *Rk*, parâmetros de volume e funcionais foram avaliados. Os autores concluíram que os parâmetros de volume e os funcionais podem ser usados como alternativa para caracterizar adequadamente as superfícies brunidas, pois foram capazes de detectar as mudanças causadas na superfície nos diferentes estágios de processo de brunimento.

Entretanto, Fernandes (2014), Pereira (2016) e Arantes et al., (2017) não avaliaram o efeito do fator granulometria da ferramentas *Flex-Hone* no acabamento superficial dos cilindros. Estes autores utilizaram ferramentas com granulometria de 800 *mesh* apenas. Ainda, o fator “número de golpes” foi avaliado em três níveis (1 golpe, 2 golpes e 3 golpes) por Pereira (2016). Se observou que com 3 golpes da ferramenta é possível obter perfis de rugosidade similares aos do tipo platô, Fig. 1.2. Desta forma, os valores dos níveis do fator “número de golpes” foram alterados para 1, 3 e 5 golpes considerando as ferramentas com granulometria de 800 *mesh* e 400 *mesh*, visando alcançar acabamentos mais próximos daqueles fornecidos pelo brunimento platô, que exige o uso de máquinas de elevado custo financeiro. Isto poderia aumentar o campo de aplicação do brunimento flexível.

De acordo com Pereira (2016), os picos isolados presentes na superfície, mesmo quando apresentam valores de ordenadas pouco expressivos, podem ser desgastados ou quebrados durante as primeiras horas de funcionamento do compressor. As partículas de desgaste podem se misturar com o fluido lubrificante tornando-o abrasivo. Os picos isolados podem levar à existência de contato metal-metal no par cilindro/pistão, condição esta não desejável. Ainda, a redução dos picos antes atribui ao compressor uma condição de amaciamento aumentado sua eficiência.

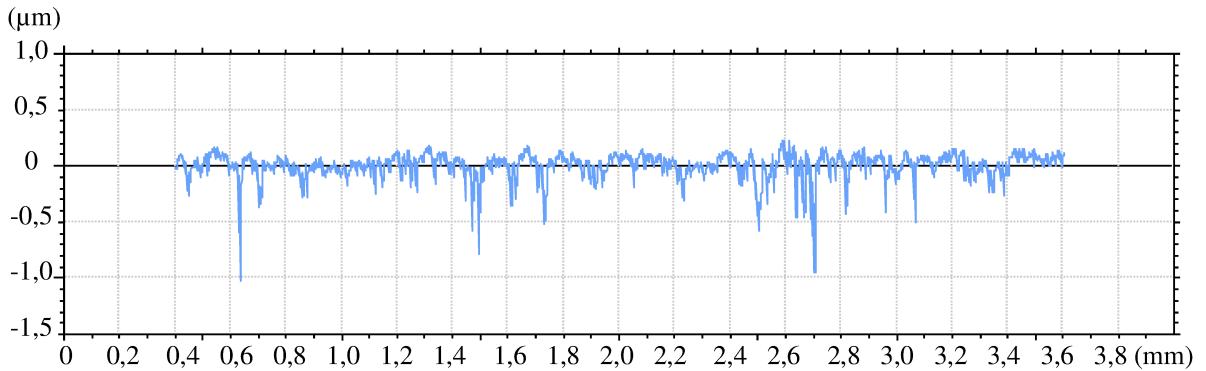


Figura 1.2 - Perfil efetivo referente ao cilindro do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível (PEREIRA, 2016).

A ampla gama de parâmetros de rugosidade avaliada se justifica porque de acordo com Anderberg et al. (2009) distinguir de forma apropriada as superfícies obtidas nos diferentes estágios do brunimento constitui um desafio. Existem diversos parâmetros de rugosidade e curvas relacionadas que são utilizados para caracterização destas superfícies. Dynarowski e Nowicki (2001), Anderberg et al. (2009), Corral e Calvet (2011), Vrac et al. (2014) utilizaram o parâmetro Ra (desvio aritmético médio do perfil). O parâmetro Rt (altura total do perfil) foi utilizado por Corral e Calvet (2011), Corral et al. (2014). Outros autores empregaram o parâmetro Rz (altura máxima do perfil) (SALJE; VON SEE, 1987, SHAIKH; JAIN, 2014).

O parâmetro Ra por representar uma rugosidade média do perfil não é capaz de fornecer informações sobre a presença na superfície da peça de picos e/ou de vales quando estes se apresentam de forma isolada. Por sua vez, o valor do parâmetro Rt pode ser fortemente influenciado pela profundidade dos vales, especialmente para superfícies do tipo platô (CLARK; GRANT, 1992), bem como para as superfícies brunidas em geral.

Sendo assim, para o processo de brunimento, em particular, os parâmetros de rugosidade que melhor caracterizam o acabamento da superfície são: Rk (Rugosidade do núcleo do perfil); Rvk (Região de vale) e Rpk (Região de pico) e duas fronteiras ($Mr1$ e $Mr2$), os quais são definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone*. Estes parâmetros são especificados na ISO 13565-2 (ISO, 1996) e têm sido empregados por Anderberg et al. (2009), Corral e Calvet (2011), e Pawlus et al. (2009) para caracterizar superfícies usinadas pelo processo de brunimento.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho é apresentado em seis capítulos incluindo esse (introdução), que abordam os seguintes aspectos:

Capítulo II: Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre os assuntos de relevância quanto a: funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético; processos de usinagem por abrasão, especialmente os de brunimento convencional e flexível; rugosidade; incerteza de medição e planejamento experimental com análise estatística (ANOVA), respectivamente.

Capítulo III: Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para investigar o efeito dos fatores (granulometria da ferramenta e número de golpes) no acabamento superficial dos cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelo processo de brunimento flexível. Esta metodologia inclui a definição do planejamento dos experimentos; o brunimento convencional dos cilindros na linha de produção da EMBRACO; o brunimento flexível dos cilindros utilizando uma fresadora CNC; a definição da estratégia de medição da rugosidade; e a avaliação da incerteza de medição dos diferentes mensurandos.

Capítulo IV: Apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos.

Capítulo V: Este capítulo discorre sobre as principais conclusões e suas considerações finais sobre a investigação e pesquisa do presente trabalho.

Capítulo VI: As sugestões e propostas para trabalhos futuros são exibidas neste capítulo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho em questão, sendo: processos de usinagem por abrasão, dando ênfase nos processos de brunimento convencional e flexível; rugosidade; incerteza de medição e planejamento de experimentos.

2.1- Compressor recíproco alternativo herméticos

O compressor é responsável por forçar a circulação do fluido no sistema de refrigeração e pode ser apresentado em diferentes configurações em relação aos aspectos construtivos. Os compressores utilizados para refrigeração podem ser divididos em relação ao deslocamento: positivo e dinâmico. Nos de deslocamento positivo o fluido refrigerante é comprimido por diminuição de volume como nos compressores alternativo e rotativo. Nos de deslocamentos dinâmicos o fluido refrigerante é acelerado através de um rotor com pás e sua velocidade é convertida em pressão. Neste trabalho é investigado um compressor alternativo, cujo processo de compressão é realizado por um pistão que reduz o volume do fluido refrigerante na câmara de compressão através do mecanismo biela manivela. O conjunto composto por cilindro e pistão deve apresentar um adequado ajuste geométrico, a fim de evitar desgastes e vazamentos, e minimizar atritos, aumentando a eficiência e confiabilidade do mesmo (ROSA, 2012).

O compressor recíproco alternativo hermético possui uma carcaça, que é uma tampa soldada hermeticamente ou selada, onde estão o motor e a unidade compressora montados no mesmo eixo, e só apresenta acessos de entrada e saída de fluido refrigerante e para conexões elétricas em sua carcaça. (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

O compressor hermético tem principal vantagem o não vazamento de refrigerante através do eixo, como pode ocorrer com os compressores abertos. A desvantagem é que não existe manutenção, pois não permite acesso aos componentes internos. Em decorrência, em caso de queima do motor elétrico ou qualquer outro dano, a única solução é a substituição total do compressor (SOTOMAYOR, 2013).

O compressor em questão é apresentado na Fig. 2.1 com seus principais componentes, em vista superior e em corte, fabricado pela EMBRACO. Já na Fig. 2.2 uma foto real do compressor recíproco alternativo hermético em visão explodida, de forma a visualizar todas as peças que o compõe.

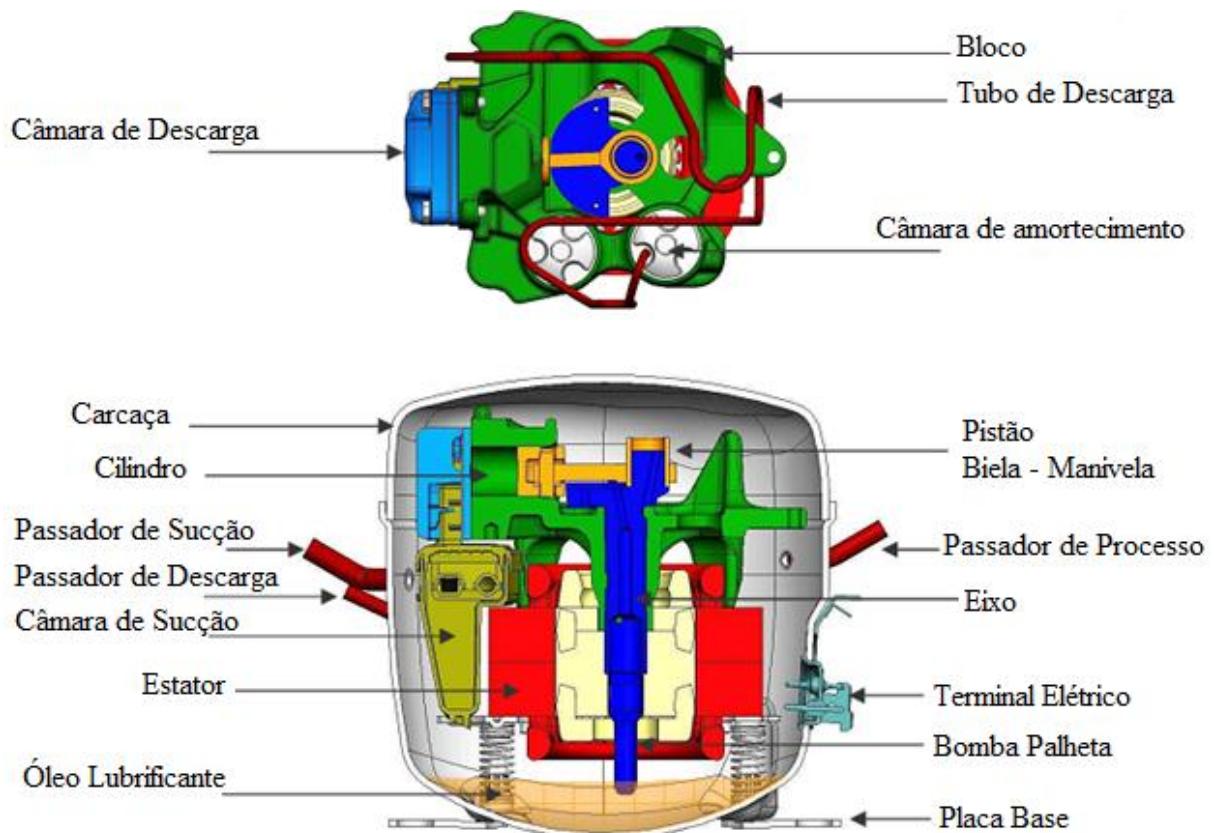


Figura 2.1 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético (RECABARREN, 2007).

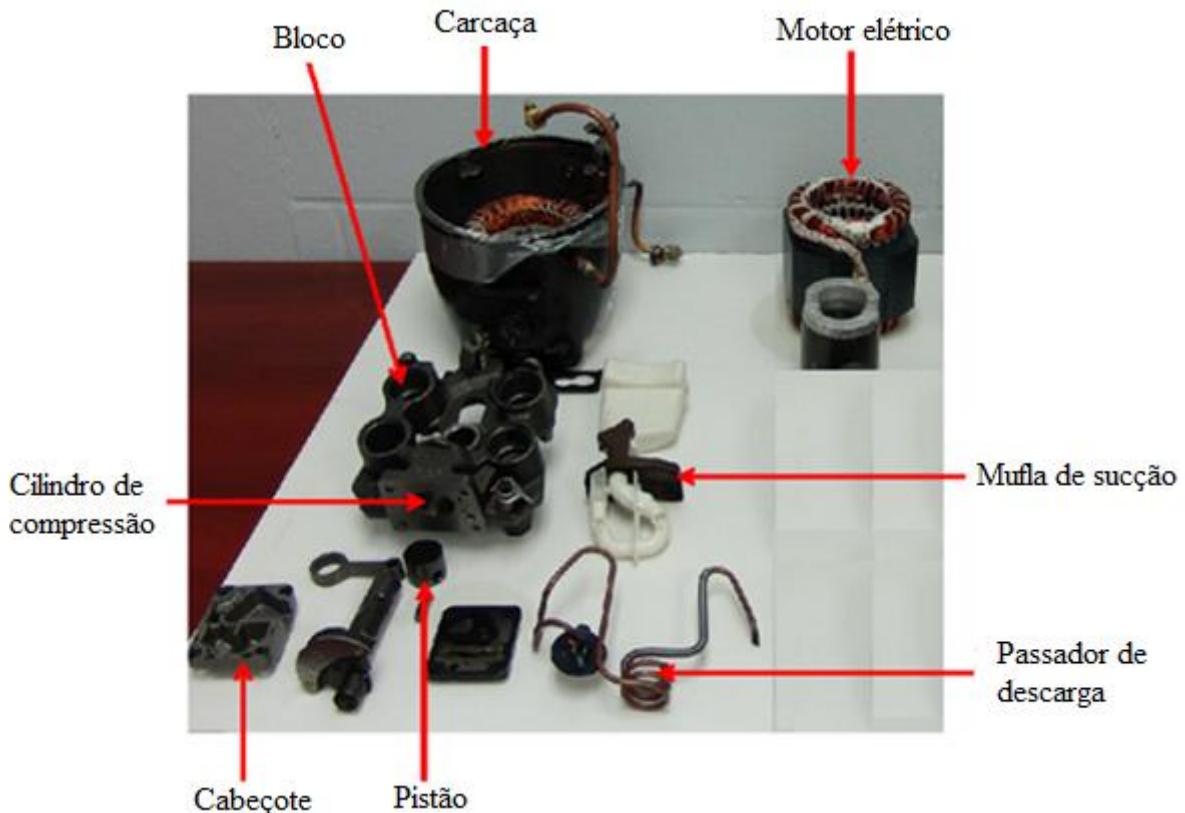


Figura 2.2 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético foto real (SOTOMAYOR, 2013).

2.1.1. Funcionamento compressor recíproco alternativo hermético

A função do compressor é transferir energia elétrica externa, para o fluxo de gás que circula em seu interior, fazendo com que o refrigerante percorra o circuito de refrigeração, vencendo as perdas de carga e realizando as trocas de calor (STOECKER, SAIZ JABARDO, 2002), (EMBRACO, 1990).

A energia elétrica fornecida ao motor do compressor faz com que esse entre em funcionamento, gerando energia mecânica em forma de movimento circular sobre seu eixo. O movimento circular do eixo excêntrico é transformado, através do conjunto biela-manivela, em movimento retilíneo uniforme do pistão. Com os movimentos combinados de abertura e fechamento das válvulas de sucção e descarga, o pistão provoca a transferência de fluido do lado de baixa pressão para o de alta pressão. Na figura 2.3 mostra o esquema do princípio de funcionamento, e como variam o volume e pressão no interior do compressor (EMBRACO, 1990), (KOERICH, 2004).

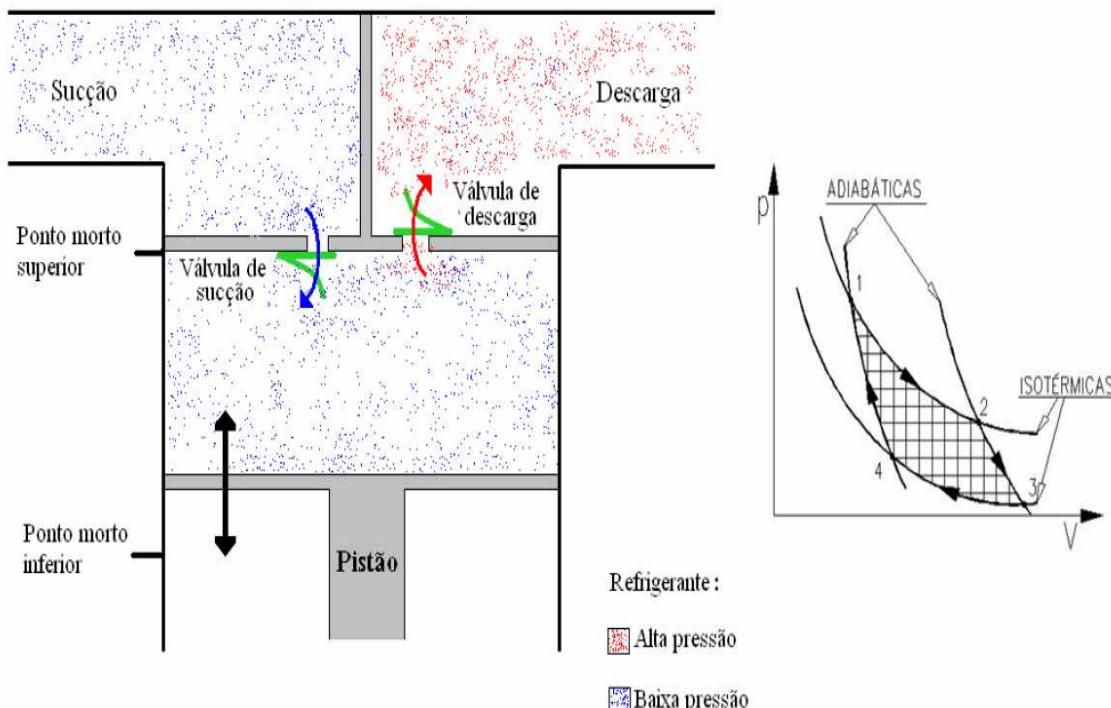


Figura 2.3 - Princípio funcionamento compressor hermético alternativo (KOERICH, 2004).

O movimento do pistão possui dois limites físicos, o ponto morto superior e o ponto morto inferior. Durante o sentido de movimentação do pistão do ponto morto superior para ponto morto inferior é chamado de etapa de expansão, em que o fluido refrigerante no interior do cilindro sofre um processo de expansão em função do aumento de volume. Quando a pressão no interior do cilindro torna-se menor que na região de sucção a válvula de sucção se abre permitindo a entrada de fluido refrigerante. Durante toda a etapa a pressão interna é menor do que a pressão de descarga, assim a válvula de descarga permanece fechada impedindo a saída do fluido refrigerante do cilindro. Essas válvulas são comandadas unicamente pela diferença de pressão (EMBRACO, 1990), (KOERICH, 2004).

Quando o limite físico do ponto morto inferior é atingido o pistão movimenta-se no sentido contrário, ponto morto inferior para ponto morto superior, e o fluido vai sendo comprimido e a pressão interna do cilindro aumentando, chamada de etapa de compressão. Nesta etapa, pelo fato da pressão interna ser maior que a de sucção, a válvula de sucção permanece fechada e, quando a pressão interna atinge um ponto em que é maior que a pressão de descarga, a válvula de descarga se abre permitindo com que o fluido refrigerante seja direcionado, sob alta pressão, para o resto do sistema. Quando o pistão atingir o ponto morto superior um novo ciclo é iniciado (KOERICH, 2004).

2.1.2. Cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético

O ferro fundido cinzento é o material utilizado para a fabricação do bloco do compressor recíproco alternativo hermético. Esta liga apresenta uma microestrutura constituída de carbono na forma livre, grafita em formato lamelar e carbono na forma combinada de cementita (Fe_3C). Seus principais elementos de liga são o carbono e o silício, podendo encontrar também manganês, cromo e cobre que atribui características específicas ao material de acordo com a concentração (LOBO, 2015).

As características mais importantes do ferro fundido cinzento são: excelente usinabilidade, ductilidade nula, boa resistência mecânica, alta capacidade de amortecer vibrações, fácil fusão e tenacidade superior aos ferros fundidos brancos. Estas características levam a utilização do ferro fundido cinzento para a fabricação das diversas peças mecânicas, como: carcaças de compressores, blocos de motores, cabeçotes, engrenagens, tambores de freio e máquinas (SCHULER, 1998).

A câmara de compressão ou cilindro, na qual trabalha o pistão, requer elevada exatidão dimensional e geométrica, a fim de minimizar o atrito gerado pelo contato metal-metal entre a ação cilindro-pistão e evitar vazamentos e desgastes. Assim, durante a fabricação do cilindro do bloco do compressor empregam-se diferentes processos de usinagem, como furação, alargamento e brunimento. Para atingir as tolerâncias dimensionais e geométricas requeridas, são realizadas operações de brunimento em dois ou três estágios, definidos pela exigência de projeto e produto. No caso do compressor recíproco alternativo hermético utiliza-se para o brunimento a ferramenta chamada de brunidor precidor, que possibilita atender a tolerâncias de forma, como o desvio de circularidade, de até 1 μm , Fig. 2.4



Figura 2.4 - Brunidor do tipo precidor utilizado no brunimento de blocos de compressores herméticos (BRUNITEC, 2017).

O precidor com seu mandril ajustável, com um corpo maciço impregnado de grãos abrasivos ou com réguas abrasivas expansíveis é projetado para a execução de usinagem em furos longos, com ou sem interrupção (NAGEL, 2017).

Este presente trabalho investiga uma operação de usinagem de acabamento no cilindro do bloco compressor recíproco alternativo hermético em que é realizado após o brunimento com o precidor, denominado de brunimento flexível.

2.2- Usinagem por abrasão

Usinagem é um conjunto de operações que dão forma, dimensão ou acabamento a uma peça através da remoção de material (cavaco), segundo a norma DIN 8580 (DIN,2003). O cavaco é retirado pela ferramenta de corte e caracteriza-se pela forma irregular.

Em diferentes situações, ou exigências de acabamento e tolerância dimensional requeridas numa peça e/ou componente são bastante rígidas, com, por exemplo, mancais de rolamento de rolos ou esferas, pistões, válvulas, cilindros, estampos de corte, moldes, matrizes, cames, engrenagens e componentes de precisão aplicados em instrumentação, geralmente necessitam de acabamentos finos e tolerâncias dimensionais bem apertadas (SOUZA,2007).

Um método para se obter tais características de acabamento em peças é através da usinagem por abrasão. Denomina-se usinagem por abrasão o processo mecânico de remoção de material no qual são empregados grãos abrasivos, de alta dureza, unidos por um ligante ou soltos, que são postos em contato com o material da peça. Tem por objetivo melhorar as exatidões dimensionais e geométricas, a qualidade superficial de peças e/ou alterar as suas características superficiais (SOUZA, 2007).

Na Figura 2.5 é apresentada a faixa típica de rugosidade média (R_a) obtida para alguns dos processos de fabricação, em que mostra a faixa de rugosidade média (R_a) para o brunimento varia de 0,1 a 0,8 μm .

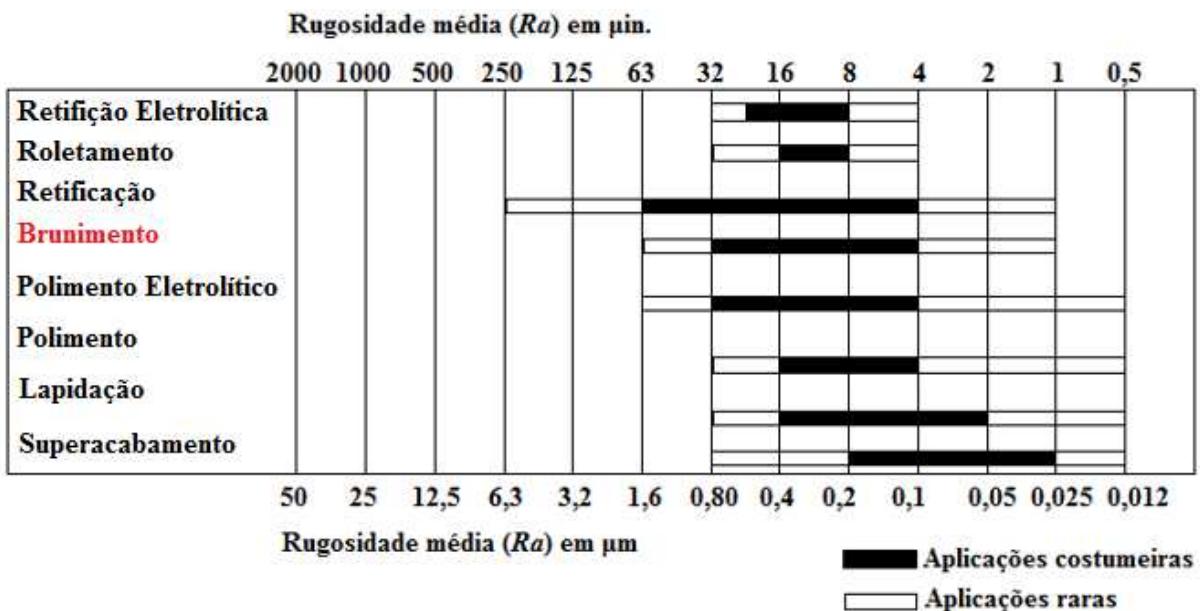


Figura 2.5 - Valores de rugosidade média (R_a) para algumas operações de usinagem (AARON et al., 1995).

Dentre os processos de usinagem por abrasão, neste trabalho destaca-se o brunimento, que será abordado a seguir.

2.2.1. *Brunimento*

Com a crescente necessidade de aumentar a vida útil de componentes mecânicos trabalhando como pares tribológicos, aliados ao menor consumo de óleo, tem desenvolvido várias técnicas de acabamento e superacabamento superficial, seja em motores de combustão interna, seja em compressores herméticos para refrigeração.

A Figura 2.6 apresenta uma relação entre os valores obtidos para os parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk} (rugosidade do núcleo, região de pico e região de vale) de acordo com os diferentes processos de acabamento superficial. Estes parâmetros permitem avaliar o desgaste, retenção de filme lubrificante e a região da superfície adequada ao funcionamento do motor. Verifica-se que em comparação com o processo convencional, os processos de brunimento *Plateau* ou platô e *Slide*, têm-se menores valores de R_k e vales relativamente profundos (JOCSAK et al, 2005)

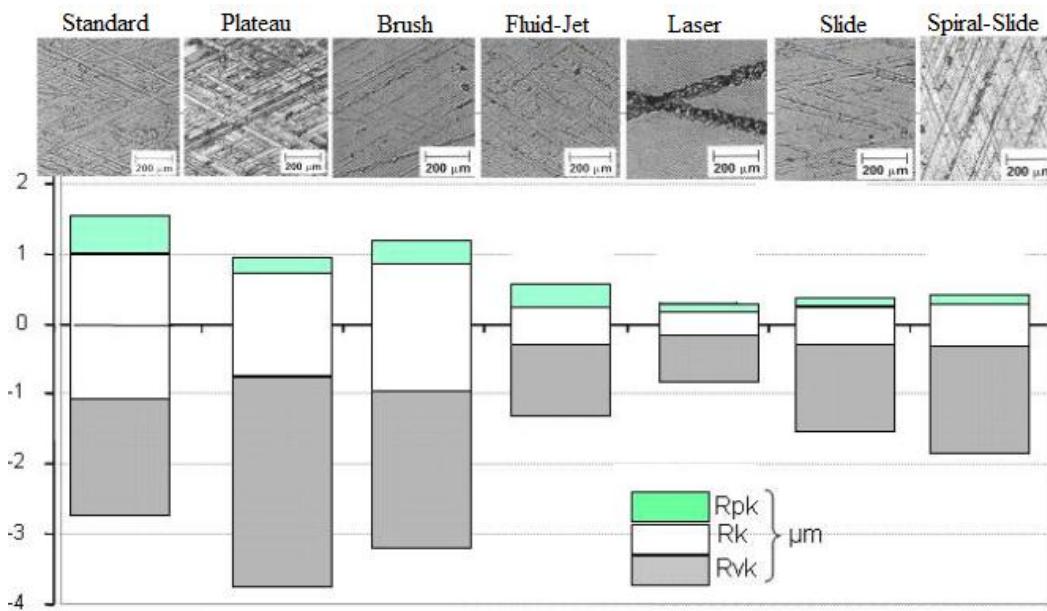


Figura 2.6 - Valores de rugosidade Rk , Rpk e Rvk para os diferentes processos de acabamento de superfície (JOCSAK et al, 2005).

O brunimento é um processo mecânico de usinagem a baixa velocidade de corte em que a ferramenta gira e se desloca axialmente descrevendo uma trajetória helicoidal. Estes movimentos formam um desenho característico de ranhuras cruzadas na superfície da peça. Por ser um processo de velocidade reduzida as temperaturas geradas são baixas não alterando a estrutura do material (CGM, 2017).

O brunimento pode ser considerado um processo econômico, sendo utilizado principalmente para produzir superfícies com ranhuras, próprias para a retenção de lubrificantes. Este tipo de superfície é recomendado para aplicações que exigem lubrificação para diminuir os efeitos indesejáveis do contato metal-metal de peças móveis, como bloco de motores, cilindros de compressores, cilindros hidráulicos e componentes de sistemas de injeção diesel (BAHRE, SHMITT e MOOS, 2012).

As tolerâncias dimensionais e as especificações de rugosidade necessárias para o adequado funcionamento das peças são atingidas mediante operações de brunimento, geralmente em dois ou três estágios, definidos em virtude das exigências do produto e das características do processo. No caso de motores a diesel, a grande maioria passa pelo processo de acabamento denominado brunimento platô, ou uma variação deste, correspondendo a um processo com três etapas: brunimento de desbaste, brunimento de base e brunimento de platô. As ranhuras geradas pelo processo de brunimento têm a importante função de reter o óleo na

parede do cilindro e o ângulo de cruzamento das ranhuras é especificado a fim de garantir a correta lubrificação do sistema pistão-anéis-cilindro (LEÓN, 2002; KNOPF et al., 1998).

As ranhuras podem também causar diminuição do atrito ou podem ser armadilhas para partículas de desgaste, minimizando o desgaste abrasivo (ETSION, 2005; YUSSEFIAN, KOSHY, 2013).

O ângulo de cruzamento, mostrado na Fig. 2.7, é definido pela composição de velocidades axial e tangencial da ferramenta de brunir, que possui três movimentos simultâneos: oscilação axial, rotação e expansão radial dos segmentos abrasivos de brunimento.

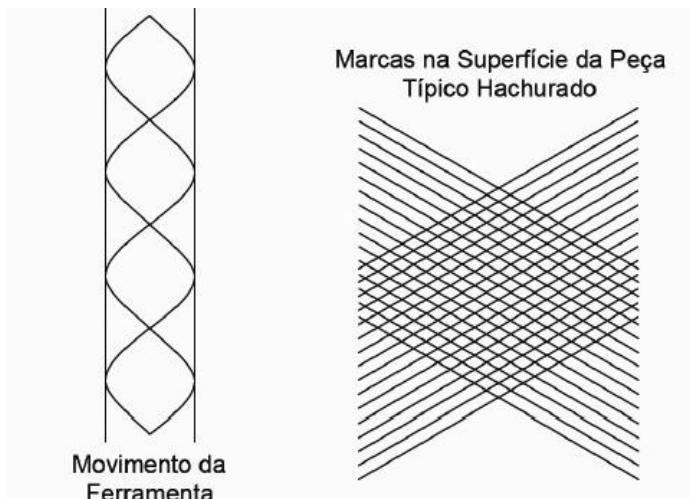


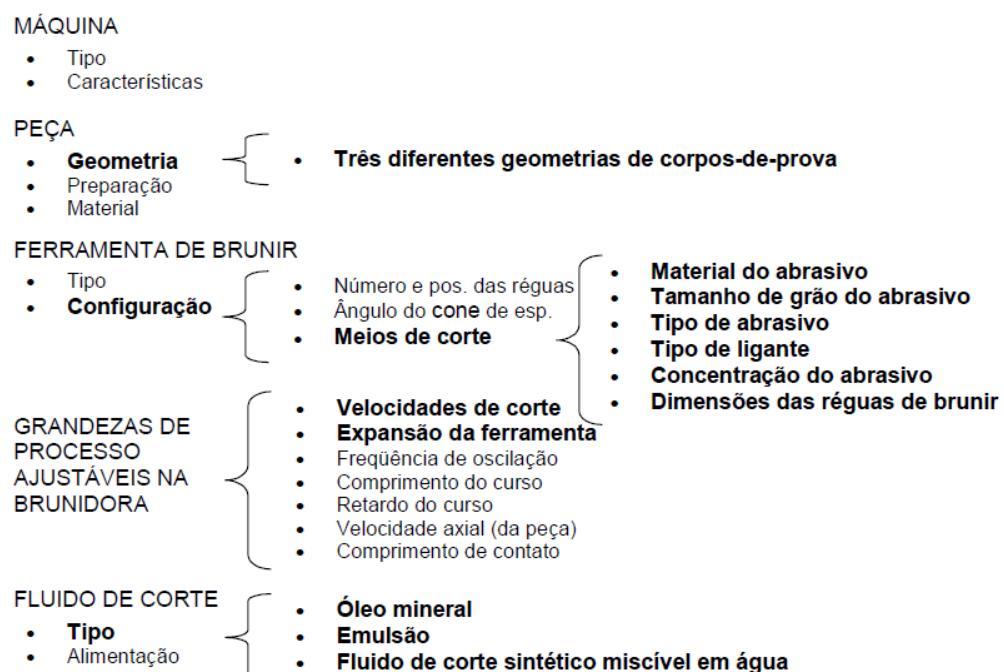
Figura 2.7 – Movimento da ferramenta e marcas hachuradas na superfície da peça (CGM, 2017).

Sendo caracterizado como um processo de usinagem por abrasão, durante o brunimento, os grãos ativos do brunidor entram em contato com a superfície da peça. Esta gira lentamente e o brunidor desloca-se ao longo da geratriz da superfície de revolução com movimentos alternativos de pouca amplitude e frequência relativamente grande. O material é removido pela penetração gradativa dos grãos abrasivos do brunidor combinado com os movimentos simultâneos de avanço e rotacional da ferramenta. Sendo que o material removido devido ao cisalhamento dos grãos aglomerados da pedra de brunimento entra em contato com a superfície da peça.

O movimento do brunidor gera as marcas típicas na superfície em formato hachurado com traços entrelaçados (cruzados), conforme Fig. 2.7. As velocidades de avanço e rotação definem o ângulo de cruzamento, sendo de 90° quando se tem velocidades iguais de avanço e de rotação, e menor que 90° quando a velocidade de rotação é maior do que a velocidade do avanço.

O brunimento além de permitir a remoção rápida e econômica de material, em relação aos demais processos de usinagem, também tem aquecimento e distorções mínimas, gerando superfícies circunferenciais e de corte retilíneo, corrigindo desvios geométricos ocasionados pelos processos de fabricação anteriores e a obtenção de um acabamento superficial melhor, conforme o desejado e com boa qualidade dimensional referência.

De acordo com König (1980), diversos parâmetros influenciam diretamente na qualidade dos sulcos gerados durante o brunimento, e consequentemente na rugosidade da peça, são eles: pressão de contato entre os abrasivos e a peça a ser brunida, rotação e avanço da ferramenta, o tipo de fluido de corte utilizado, tipo de abrasivos ou pedras de brunimento, tipo de ligante, tamanho do grão abrasivo, temperatura de usinagem, concentração de abrasivos, rigidez da ferramenta, frequência de oscilação, dentre outros, como é mostrado na Fig. 2.8.



Sabe-se que quanto menor o tamanho do grão abrasivo menor é a rugosidade gerada na peça pelo brunimento. Ainda, o aumento da pressão entre os abrasivos e a peça aumenta a rugosidade piorando o acabamento superficial. Por fim o aumento da rotação da ferramenta diminui a rugosidade da peça (CORRAL; CALVET; SALCEDO, 2010).

No processo de brunimento interno, a característica geométrica principal da peça a ser brunida é a espessura de parede do cilindro, seja de uma camisa de cilindro brunida isoladamente ou de um cilindro de um bloco de motor. Tal espessura influencia diretamente na qualidade dimensional da peça e pode contribuir para a deformação da peça devido à pressão de contato dos segmentos abrasivos de brunimento, bem como na distribuição de temperatura na parede do cilindro.

Paredes finas geram maiores distorções no cilindro durante a ação da ferramenta. Espessuras de parede variáveis do cilindro, aliadas à geometria da própria peça, distribuem de maneira não uniforme o calor gerado no brunimento, causando uma maior deformação no cilindro após a aplicação deste processo (KLINK, 1983; YOKOHAMA; ICHIMIYA, 1984). Outra característica importante quanto à geometria da peça consiste no espaço para a saída da ferramenta. O desejável é que seja de aproximadamente 1/3 do comprimento do segmento abrasivo de brunimento, frequentemente implicando a necessidade de emprego de estratégias como o retardo do curso no ponto morto inferior, uso de curso com menor comprimento, alteração geométrica dos segmentos abrasivos de brunimento ou ainda do próprio conceito da ferramenta (KLINK, 1981; HAASIS, 1980; LYSENKO, 1980). Ressalta-se, ainda, a influência da geometria da peça em seus modos de vibração e frequências naturais, o que pode influenciar significativamente no resultado do brunimento, em termos de geração de desvios de circularidade devido à geração de ondulações ou marcas de vibração na superfície do cilindro brunido.

2.2.2. Brunimento Convencional

A característica fundamental de uma ferramenta de brunimento convencional é a possibilidade de expansão da ferramenta de brunir de forma automática, durante o processo de brunimento. A Figura 2.9 ilustra a nomenclatura das principais partes de uma ferramenta de brunir, exemplificando com uma ferramenta de expansão simples.

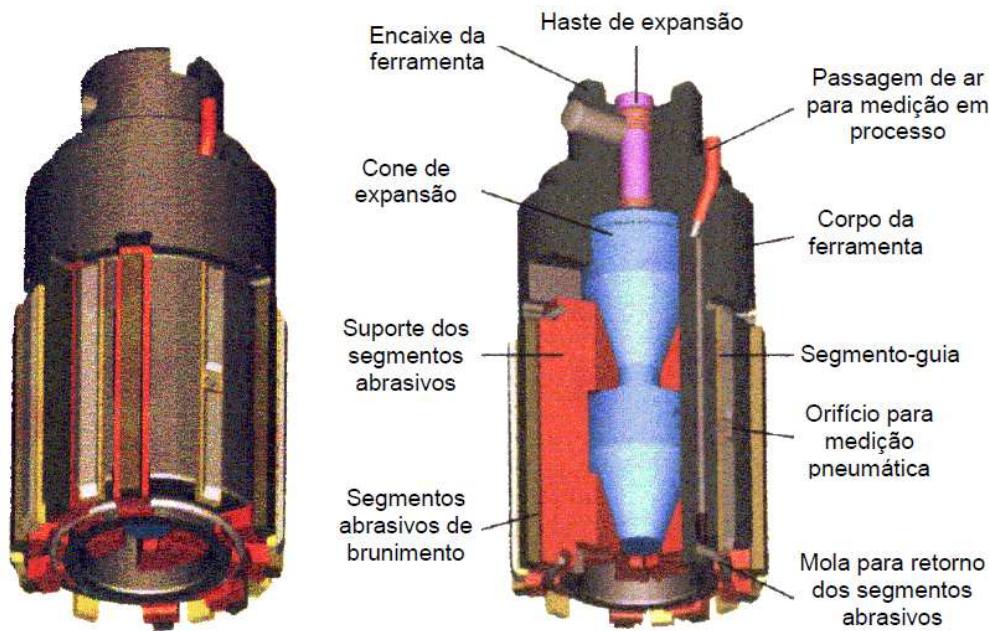


Figura 2.9 - Partes constituintes de uma ferramenta de brunir (WEIGMANN, 2005b).

A expansão dos segmentos abrasivos de brunimento se dá por meio da ação dos cones de expansão, os quais são acionados pela máquina de brunir. A movimentação dos cones, e o consequente o deslocamento radial dos segmentos abrasivos, pode ser realizada por meio de duas estratégias: controle da força de expansão ou controle da posição da expansão.

A parte mais importante da ferramenta de brunir é o conjunto de elementos que faz a interface direta com a peça, ou seja, o conjunto de segmentos abrasivos (FLORES, 1998). Suas principais características são o material, o tamanho e o tipo de abrasivo, o tipo de ligante e a concentração do abrasivo. Podem ser expressas por meio de um código padrão, conforme exibido na Fig. 2.10.

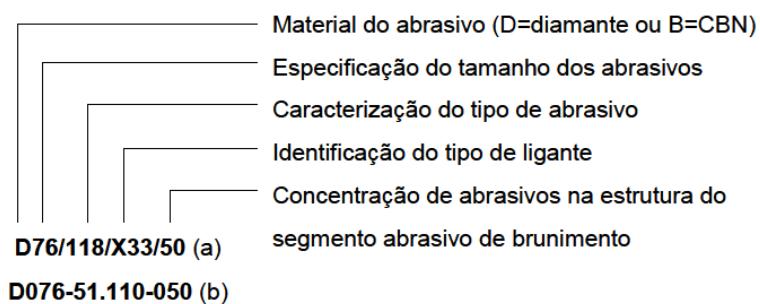


Figura 2.10 - Codificação das características de segmentos abrasivos de brunimento, de acordo com os fabricantes (a) Nagel e (b) Gehring (NAGEL, 1990; GEHRING, 2003).

2.2.3. Material dos grãos abrasivos

Na usinagem por brunimento, os grãos abrasivos que são utilizados para promover a ação de corte na peça devem e precisam da pressão necessária para a retirada do material. Os grãos abrasivos podem pertencer a duas categorias: os convencionais e os superabrasivos. Os materiais abrasivos normalmente empregados em processos de brunimento são os abrasivos convencionais, tais como óxido de alumínio e carboneto de silício, ou os chamados superabrasivos, como o diamante e o nitreto de boro cúbico (JUCHEN, 1986; KLICK, 1989). Os superabrasivos, conforme Fig. 2.11, apresentaram um significativo aumento de utilização em processo de brunimento e já em 1998 cerca de 90% das aplicações empregavam diamante ou CBN como material de corte, sendo o diamante empregado principalmente em aços de baixo carbono, ferros fundidos e aços nitretados, enquanto o CBN tem sua principal utilização em aços endurecidos (acima de 60 HRC) (FLORES, 1998).

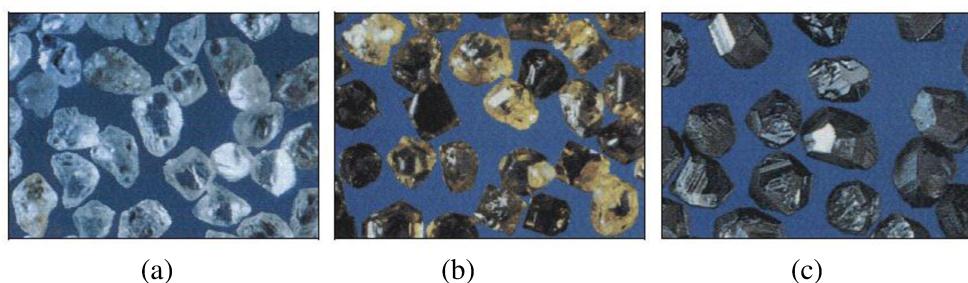


Figura 2.11 - Exemplos de grãos superabrasivos: (a) diamante natural; (b) diamante sintético; (c) CBN (NAGEL, 1990).

A Figura 2.11 ilustra grãos abrasivos de diamante natural, diamante sintético e de CBN, empregados em processos de brunimento. O diamante sintético pode apresentar diferentes propriedades, de acordo com os parâmetros de fabricação empregados, controlando-se a forma e a friabilidade do grão (NAGEL, 1990; YAMAMOTO et al., 1977).

Segundo Chandler et al. (1987), a escolha do tamanho do grão no processo de brunimento é determinante e depende principalmente da taxa de remoção de material e do acabamento desejável. Sendo que grãos maiores removem o material em uma velocidade maior, porém com um inconveniente de produzir um acabamento mais grosso na superfície

da peça. Devido a isso, se torna mais econômico e necessário aplicar uma operação de acabamento após o brunimento de desbaste.

Na maioria dos casos, com a redução do tamanho dos grãos abrasivos, a rugosidade da superfície gerada passa a assumir valores menores, da mesma forma que a taxa de remoção de material (FLORES, 1998).

Em suma, a seleção do abrasivo depende principalmente da dureza e da composição do material a ser usinado, do acabamento pretendido e de fatores econômicos.

2.2.4. Tamanho de grão do abrasivo

O tamanho de grão do abrasivo é um fator decisivo na taxa de remoção de material, bem como na qualidade da superfície da peça. Na maioria dos casos, com a redução do tamanho dos grãos abrasivos, a rugosidade da superfície gerada passa a assumir valores menores, da mesma forma que a taxa de remoção de material (FLORES, 1998).

A faixa de rugosidades comumente observada nas diversas etapas do processo de usinagem dos cilindros de blocos de motores, a partir do mandrilamento em acabamento até o brunimento platô, é destacada na Fig. 2.12. Nela verificam-se valores típicos de rugosidades e de remoção de material para o brunimento platô de cilindros em ferro fundido cinzento. Para que posteriormente seja estabelecida uma comparação com o brunimento de desbaste do ferro fundido vermicular, salienta-se que o brunimento de desbaste convencional, que antecede um brunimento platô gera, tipicamente, uma rugosidade R_z entre 22 e 28 μm , e uma remoção de apenas 0,03 a 0,06 mm no diâmetro do cilindro (NAGEL, 2000).

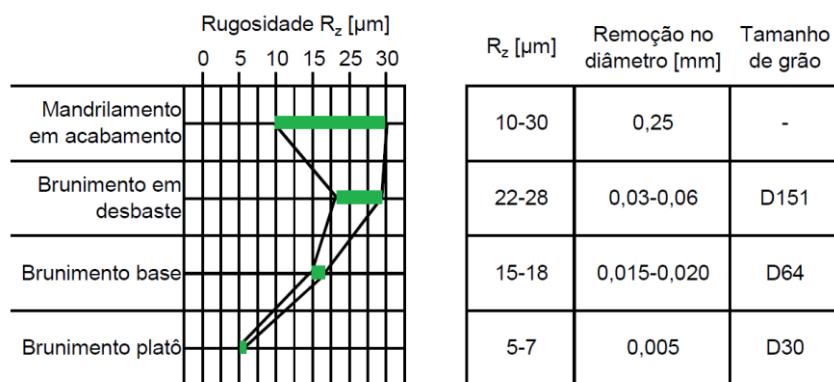


Figura 2.12 - Evolução da rugosidade da peça ao longo do processo de usinagem para o brunimento platô (NAGEL, 1990).

No processo de brunimento de cilindros de ferro fundido cinzento com ferramentas de diamante, podem-se utilizar desde grãos de maior tamanho no processo de brunimento de desbaste, tais como D151, tamanho intermediário no segundo estágio de brunimento, como D64 e grãos finos, por exemplo, D30, no brunimento platô. Cada classe de tamanho de grão abrasivo corresponde a uma faixa de tamanho, nesse caso conforme a classificação FEPA (NAGEL, 2003). Uma classificação menos usual para superabrasivos, porém comum para abrasivos convencionais, é dada em *mesh*.

A dimensão e uniformidade dos grãos são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. O tamanho dos grãos em "mesh" representa o número de fios por polegada linear da peneira do processo de seleção. Para grãos de diamante ou CBN é usada também a classificação da FEPA (Federação Europeia dos Fabricantes de Abrasivos) que especifica a abertura da malha da peneira em μm (STEMMER, 1993). As dimensões dos grãos de diamante são indicadas internacionalmente pelo sinal "D". O número subsequente indica o diâmetro médio da granulação em micrometros (HILLE, 1990). As especificações dos grãos apresentadas nas normas FEPA ISO 6106-1979 e DIN 848-1965, são mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Comparação entre as normas FEPA ISO 6106-1979 (1979) e DIN 848-1965 (1965).

FEPA	DIN	GRANULOMETRIA	
		em μm	em MESH
D 7	D 7	5...10
D 15	D 15	10...20
D 20	D 20	15...25
D 30	D 30	20...40
D 46	D 40	38...45	325...400
D 54	D 50	45...53	270...325
D 64	D 60	53...63	230...270
D 76	D 70	63...75	200...230
D 91	D 80	75...90	170...200
D 107	D 100	90...106	140...170
D 126	D 120	106...125	120...140
D 151	...	125...150	100...120
D 181	D 150	150...180	80...100
D 213	D 200	180...212	70...80
D 251	D 250	213...250	60...70

2.2.5. Fluidos de corte

Em processos tradicionais de brunimento, com baixas taxas de remoção de material, o fluido de corte desempenha papéis fundamentais de lubrificação, refrigeração, remoção de cavacos, dentre outros. Desse modo, o fluido de corte passa a assumir uma condição de importância ainda maior, tendo em vista a necessidade de prevenção do desgaste dos segmentos abrasivos e de resfriamento da peça.

Em um processo de brunimento, as principais funções a serem exercidas pelo fluido de corte são: remoção dos cavacos da região do corte, limpeza dos segmentos abrasivos, resfriamento da peça e do sistema, e lubrificação da região de corte (BOOR, 1989a). Podem-se citar ainda algumas funções secundárias dos fluidos de corte, comuns à maioria dos processos de usinagem: proteção contra a corrosão da peça; redução de potência de corte; melhoria da qualidade da superfície da peça; aumento de vida da ferramenta; refrigeração da máquina e da ferramenta (VALLE, 2001).

No brunimento, segundo Boor (1989a), a retirada do cavaco da região de corte é influenciada por parâmetros como viscosidade, vazão e pressão do fluido de corte. Viscosidades menores influenciam positivamente no efeito de retirada do cavaco. A disponibilidade do fluido de corte para a região de contato segmento abrasivo/peça é propiciada pela vazão de fluido adequada, a qual é dimensionada, via de regra, com base no diâmetro do furo brunido, bem como pelo correto direcionamento do fluido de corte. A capacidade de evitar a adesão de material da peça sobre os segmentos abrasivos é definida pelas características físicas e químicas do fluido.

A função de resfriamento é definida pela capacidade térmica, pela condutividade térmica e pelo calor latente de vaporização do fluido. Uma comparação entre um típico óleo de lubrificação e água, no que tange a essas características, é mostrada na Tabela 2.2 (BOOR, 1989a). Nota-se que a água, em relação ao óleo, possui propriedades significativamente superiores quanto à capacidade de resfriamento.

Outra importante propriedade do fluido de corte é sua capacidade de lubrificação, que é definida pela sua viscosidade e aditivos. O fluido de corte propicia a formação de um filme lubrificante entre a peça e os segmentos abrasivos de brunimento, o qual minimiza o atrito desse sistema tribológico (BOOR, 1989a). O entendimento das funções dos fluidos de corte e de suas propriedades permitirá estabelecer correlações com os resultados a serem

apresentados. Na sequência são mostrados os principais tipos de fluidos de corte e suas propriedades.

Tabela 2.2 - Características físicas de óleo mineral integral e água (BOOR, 1989a).

Grandeza				Típico óleo mineral	Água
Viscosidade	a	20 °C	[mm ² /s]	79	1,0
Densidade	a	20 °C	[kg/m ³]	865	1002
Capacidade térmica	a	20 °C	[kJ/(kg.K)]	1,88	4,2
Condutividade térmica	a	20 °C	[W/(m.K)]	0,133	0,6
Calor latente de vaporização	a	400 °C	[kJ/kg]	~210	–
	a	100 °C	[kJ/kg]	–	2260
Ponto de ebulição	a	1,013 bar	°C	~320	100

Os tipos de fluidos de corte atualmente empregados nos processos de usinagem, e particularmente no brunimento, podem ser classificados em dois grupos, conforme Fig. 2.13. Os miscíveis em água são ainda subdivididos em emulsões e soluções verdadeiras. Desse modo, têm-se três possibilidades: não miscíveis em água, emulsão e solução em água.

Os fluidos de corte não miscíveis em água são também denominados fluidos integrais. Podem ser minerais (óleos de petróleo de base parafínica ou naftênica), vegetais (óleos de mamona, arroz, etc.) ou ainda sintéticos (ésteres, diésteres, solventes sintéticos, etc.), adicionados ou não de materiais graxos (gordura animal ou vegetal). Os óleos integrais são compostos por um veículo e por aditivos. O veículo é o óleo, cuja viscosidade é a propriedade que imprimirá ao fluido uma maior ou menor característica lubrificante. Os aditivos empregados são diversos, com funções de permitir a lubrificação sob alta pressão, melhorar o índice de viscosidade, evitar espuma e proteger contra a corrosão, dentre outros (NOVASKI; RIOS, 2001). Os fluidos de corte integrais caracterizam-se por apresentar elevada capacidade de lubrificação e menor capacidade de refrigeração (SALES, 1999).

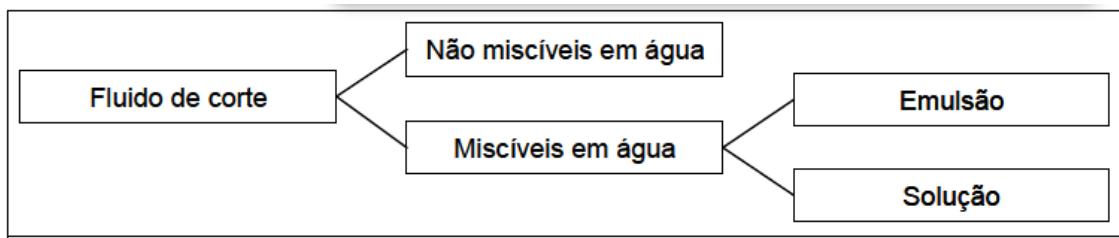


Figura 2.13 – Classificação dos fluidos de corte conforme DIN 51385,1991 (apud KLEBER, 2000).

Os fluidos de corte a base de água são subdivididos em dois grupos principais: emulsões e soluções.

Nas emulsões, o óleo, seja de qualquer origem, é finamente disperso em água por meio da ação de agentes emulsadores, que reduzem a tensão superficial da água (NOVASKI; RIOS, 2001). Em geral, as emulsões possuem propriedades lubrificantes e refrigerantes moderadas (SHELL, 1991 apud SALES, 1999). A quantidade de óleo e de aditivos nas emulsões varia de 1 a 20 %. Emulsões mais diluídas são empregadas onde a função fundamental é a refrigeração, enquanto a lubrificação é secundária. Emulsões com aditivos de extrema pressão são empregadas em concentrações maiores, priorizando o efeito de lubrificação. Emulsões com elevada capacidade de lubrificação podem substituir óleos integrais (NOVASKI; RIOS, 2001).

No grupo das emulsões, encontram-se também as microemulsões. Estas constituem emulsões com pequena quantidade de óleo e são transparentes. Também são denominadas de fluidos semi-sintéticos (NOVASKI; RIOS, 2001).

O terceiro grupo corresponde às soluções. São fluidos sintéticos que são miscíveis à água, formando soluções verdadeiras. Os fluidos sintéticos miscíveis em água caracterizam-se por oferecerem uma maior resistência ao crescimento de microorganismos, em relação às emulsões (NOVASKI; RIOS, 2001).

Em relação às propriedades refrigerantes e lubrificantes, Sales (1999) realizou estudos comparativos entre um óleo integral mineral com aditivos de extrema pressão, uma emulsão com óleo mineral e aditivos e dois tipos de fluidos sintéticos de base aquosa com aditivos de extrema pressão. Ensaios de usinagem de torneamento e furação, além de medições de temperatura e o emprego da técnica de esclerometria pendular, possibilitaram classificar os fluidos de corte testados quanto à capacidade de lubrificação, sendo o melhor deles o fluido

integral mineral, seguido da emulsão e, por fim, os dois fluidos sintéticos. Já com relação à capacidade de refrigeração, os mesmos foram classificados em ordem exatamente inversa (SALES, 1999).

Como regra geral, tem-se a escolha do fluido de corte com base principalmente em sua viscosidade, a qual é escolhida em função do material a ser brunido. Para segmentos abrasivos de brunimento diamantados, tem-se a possibilidade de escolha entre fluidos de corte integrais ou a base de água. A Figura 2.14 ilustra, de modo simplificado, a influência do material a ser brunido na escolha do fluido de corte (NAGEL, 1997a).

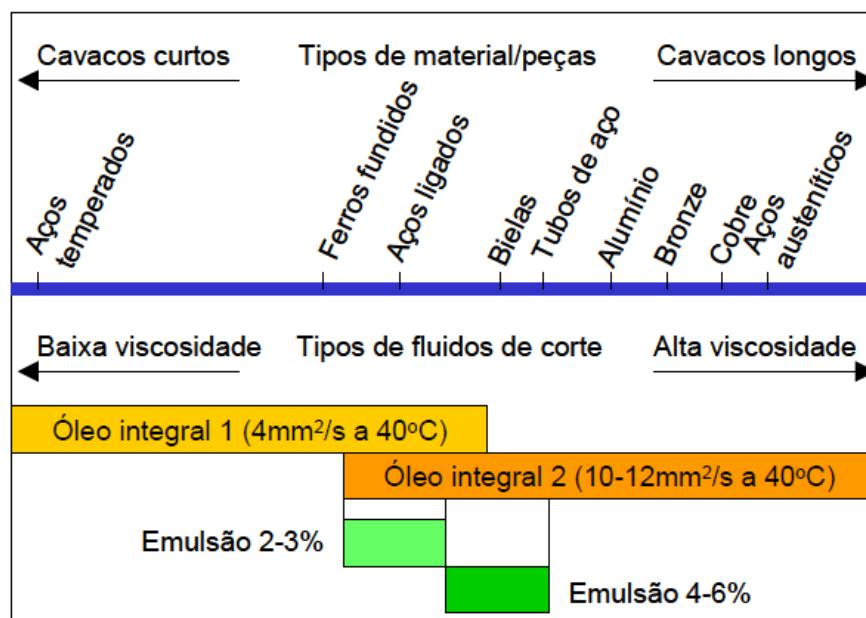


Figura 2.14 - Diagrama de escolha do fluido de corte em função do material da peça (NAGEL, 1998b).

Resultados empíricos sugerem o emprego de fluidos de maior viscosidade para materiais de cavaco longo e de menor viscosidade para materiais de cavacos curtos. Para ferros fundidos empregam-se, normalmente, óleos integrais de baixa viscosidade ou fluidos a base de água, cuja escolha é feita em virtude de cada processo específico (MOCELLIN, 2007).

No passado, a escolha por fluidos de corte a base de água era realizada em situações em que se desejava compartilhar o fluido com outras máquinas (KLINK, 1981). Atualmente

utilizam-se fluidos de corte com base aquosa também em situações nas quais há uma necessidade de maior resfriamento, em decorrência das tolerâncias a serem obtidas.

2.2.6. Ligantes

O ligante, também chamado de liga aglomerante ou aglutinante, tem a função e a finalidade de unir os grãos abrasivos entre si e também, caso seja necessário, com a ferramenta de suporte e são divididos em dois grupos, são eles: inorgânicos e orgânicos. Os inorgânicos podem ser magnesita (O), metálicos (M), siliciosos (S) ou vitrificados (V). Os orgânicos por sua vez podem ser borracha (R), goma-laca (E) ou resinoide (R). Dentre os citados, destacam-se, do grupo dos ligantes inorgânicos, as ligas vitrificadas, e do grupo dos ligantes orgânicos as ligas resinoides.

Os ligantes metálicos sinterizados empregados com abrasivos de diamante ou CBN são geralmente constituídos de bronze (liga cobre e estanho), aço ou ainda metais nobres (NAGEL, 1990). Ligantes eletrodepositados, empregados em ferramentas de passe único, utilizam ligas a base de cromo, cobalto, níquel ou cobre (FISCHER; BYRNES, 1991). Através da escolha da composição, assim como dos parâmetros de sinterização, diferentes propriedades da liga podem ser obtidas. As características mais importantes dos ligantes são a resistência ao desgaste, capacidade de retenção dos grãos abrasivos e dureza, as quais tem influência direta na capacidade de corte e na vida dos segmentos abrasivos de brunimento (GEHRING, 2003).

Em rebolos superabrasivos e ferramentas de brunir de camada única de abrasivos, uma importante alternativa para aumentar a capacidade de sustentação do grão abrasivo pelo ligante consiste na estratégia de brasagem reativa. Esta permite que a ligação do abrasivo ao ligante, normalmente de natureza mecânica, seja aumentada por uma ligação química. Elementos formadores de nitretos ou carbonetos, tais como Cr e Ti, adicionados à liga do ligante, formam ligações químicas com os superabrasivos (CBN ou diamante), aumentando significativamente sua força de sustentação (GHOSH; CHATTOPADHYAY, 2007; HINTERMANN; CHATTOPADHYAY, 1992).

O índice de porosidade também é influenciável pelo processo de obtenção dos ligantes. Ligantes porosos podem apresentar melhor capacidade de corte, mas com maior tendência ao desgaste (NAGEL, 1990; HAASIS, 1975b). Além de ligantes metálicos, aplicações específicas podem empregar ligantes cerâmicos (vitrificados) ou sintéticos (resinoides) com superabrasivos (GEHRING, 2003).

2.2.7. Cinemática

No brunimento de curso longo, a cinemática resulta da combinação dos movimentos de rotação e de avanço, ambos executados pela ferramenta. Em decorrência, a velocidade de corte resultante (V_{ct}) é a soma vetorial de uma componente tangencial (V_{ct}) com uma componente de avanço (V_{ca}). Esta última é praticamente constante ao longo do curso de brunimento, contudo nas proximidades do ponto morto superior e inferior chega a zero. A cinemática do processo proporciona a formação de finos traços entrecruzados, na superfície brunida, sendo esta uma das principais características do processo de brunimento, Fig. 2.15. O ângulo de cruzamento (α) que se forma entre as linhas de remoção é função da composição da velocidade de corte e, genericamente, situa-se entre 20° e 60° (SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, 1983).

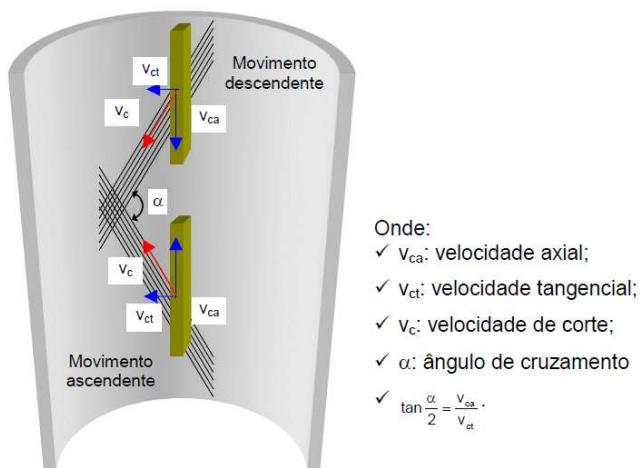


Figura 2.15 - Velocidades presentes no brunimento de curso longo convencional e formação do ângulo de cruzamento (KÖNIG, 1989).

A velocidade de corte V_c é obtida pela soma dos vetores V_{ca} e V_{ct} e é expressa em m/mim. Esta velocidade pode ser calculada por meio da Eq. (2.1).

$$V_c = \sqrt{(V_{ca})^2 + (V_{ct})^2} \quad (2.1)$$

Os vetores V_{ca} e o seu oposto, de mesma direção e sentido oposto, representam à velocidade de avanço que o cabeçote brunidor executa dentro do cilindro, ao passo que o

vetor V_t é a velocidade tangencial resultante que aparece em decorrência do movimento de rotação do cabeçote.

A velocidade tangencial de um corpo rígido pode ser calculada pela Eq. (2.2).

$$V_{ct} = \pi \cdot d_c \cdot n_r \quad (2.2)$$

Onde V_{ct} é a velocidade tangencial dada em m/mim, d_c é o diâmetro interno do cilindro em mm e n_r é a rotação do cabeçote brunidor expresso em min⁻¹.

A partir da equação anterior pode-se reescrever a velocidade de corte V_c , conforme a Eq. (2.3).

$$V_c = \sqrt{(V_{ca})^2 + (\pi \cdot d_c \cdot n_r)^2} \quad (2.3)$$

O ângulo de cruzamento α é calculado com o auxílio da Eq. (2.4), sendo expresso em graus.

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{V_{ca}}{V_{ct}} \quad (2.4)$$

2.2.8- *Brunimento Flexível*

O brunimento flexível é um processo de usinagem utilizado após o brunimento convencional que atua por intermédio de partículas elásticas e abrasivas de maneira a não alterar as características anteriores da geometria da peça, tais como, cilindricidade, coaxilidade, concentricidade e dimensões da peça (MILLER, 1993). Esta operação tem o objetivo de arredondar os picos da superfície (BARTON; HAASIS, 1993).

O brunimento flexível pode ser classificado em dois tipos, em relação ao material abrasivo da ferramenta brunidora, são eles: brunimento flexível do tipo esferas e brunimento flexível do tipo escovas ou cerdas.

No brunimento flexível do tipo esferas a ferramenta brunidora possui glóbulos abrasivos com forma esferoidal ligados às pontas de filamentos de nylon flexível. Cada esfera abrasiva é composta de múltiplas camadas, que se degradam a uma taxa prevista e controlada de exposição continua das arestas cortantes (MILLER, 1993). A pressão de contato entre o furo e a ferramenta é devido o diâmetro da ferramenta ser maior do que o diâmetro do furo,

garantindo uma pressão de contato baixa, proporcionando uma taxa de remoção de material menor em comparação ao brunimento convencional.

O brunimento flexível do tipo escovas ou cerdas pode ser executado utilizando duas ferramentas brunidoras. Uma ferramenta é muito parecida com escova de limpar garrafas, consiste de uma vareta que gira e possui cerdas monofilamentosas de nylon impregnadas de abrasivos, onde o processo de retirada de material consiste no chicoteamento da superfície da peça pelos monofilamentos de nylon (VISQUE, 1998). A outra consiste em filamentos de nylon também impregnados de abrasivos, afixados lado a lado, formando uma seção retangular, com uma altura pré-estabelecida. Um suporte dá a coesão necessária ao agrupamento de filamentos, formando um conjunto de filamentos, e ambos são montados em uma régua porta ferramenta de um cabeçote brunidor, como se fosse uma ferramenta de brunimento convencional (VISQUE, 1998).

Segundo Barton e Haasis (1993), o processo utilizando escovas produz uma superfície livre de partículas soltas de material, os picos da superfície ficam arredondados, o diâmetro do cilindro é aumentado em 0,002 mm a 0,003 mm e em peças de ferro fundido a quantidade de flocos de grafite expostos é aumentada.

A ferramenta brunidora flexível tipo esferas é ideal para brunir e gerar um superacabamento difícil de ser obtido por qualquer outro método de abrasão em baixa temperatura e pressão (VERTEC, 2016). Esta ferramenta é ideal para brunir, rebarbar, limpar, polir, remover óxido de ferro e dar acabamento em cilindros e tubos de qualquer material, como mostra a Fig. 2.16.

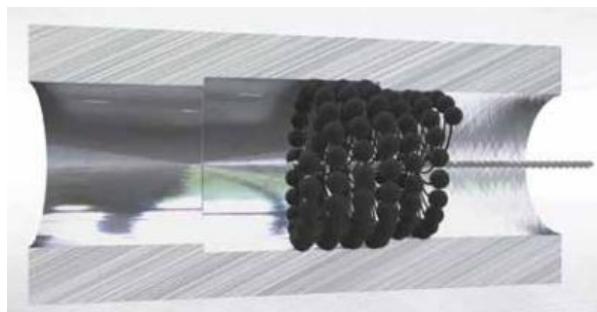


Figura 2.16 - Ferramenta brunidora flexível tipo esferas (BRM, 2015).

Essa ferramenta é indicada para brunir peças utilizadas em aplicações industriais hidráulicas e pneumáticas ou automotivas em materiais de qualquer dureza. Pode ser utilizada em cilindros com furos de comunicação, janelas e rebaixos, frestas e cantos vivos, Fig. 2.17. De forma geral, o processo de brunimento pode ser automatizado ou manual, e pode ser executado utilizando-se uma simples furadeira, onde o operador não precisa de qualificação especial.

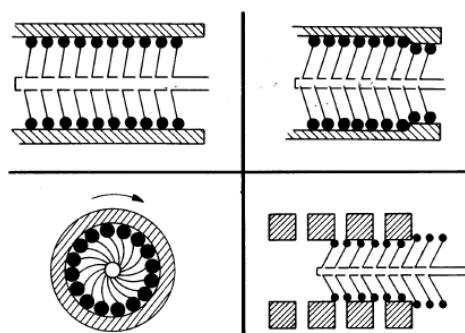


Figura 2.17 - Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2016).

Existe no mercado uma grande variedade de ferramentas, cujos diâmetros variam na faixa de 4 mm a 76 mm, fabricadas utilizando diferentes materiais abrasivos, conforme a Tab. 2.3, e diferentes granulações, que variam de 20 *mesh* a 800 *mesh* (VERTEC, 2016).

Tabela 2.3 - Recomendação dos abrasivos em relação aos materiais a serem brunidos (VERTEC, 2016).

Tipos de materiais	Abrasivos recomendados
Aço doce, aço inoxidável e ferro fundido	Carbeto de silício
Alumínio, latão e metais moles	Óxido de alumínio
Aços de médio e baixo carbono, aço inox e ferro fundido	Alumina-Zircônia (Grão Z) para maior vida útil que ferramentas de carbeto de silício
Aços de médio e alto carbono, aços com tratamento térmico até 50 Rc, titânio, Inconel e Monel	Carbeto de boro
Aços-liga de alto carbono	Carbeto de tungstênio
Polimento final em muitos materiais	Alumina moída

A ferramenta elimina picos e imperfeições da superfície dos cilindros, criando o acabamento desejável. O resultado é a redução do atrito, do aquecimento localizado e a melhoria geral no desempenho.

Em trabalho recente Arantes et al., (2017) avaliaram a qualidade dimensional e geométrica de 14 cilindros de blocos de compressores herméticos antes e após a realização do brunimento flexível. Os autores concluíram que este processo provoca a eliminação de picos isolados e a redução da altura destes, sem alterar a profundidade dos vales, proporcionando uma redução significativa dos valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_t , R_{sk} , R_k e R_{pk} e um aumento relevante do parâmetro R_{ku} . O que pode ser indicativo de melhorias nas propriedades de amaciamento da superfície, de retenção de lubrificantes, de resistência mecânica e da capacidade de suportar cargas em operações de contato.

As superfícies obtidas pelo brunimento convencional seguido do brunimento flexível são um exemplo de texturas de dois processos. Essas superfícies são semelhantes às obtidas pelo uso do processo de brunimento platô, contendo redes de ranhuras ou micro-reservatórios. As superfícies tipo platô têm boas propriedades de deslizamento e uma ótima capacidade para manter o óleo lubrificante (ETSION, 2005; YUSSEFIAN, KOSHY, 2013).

2.3. Rugosidade

Toda superfície de uma peça é composta por rugosidade ou textura primária, ondulação ou textura secundária e desvios de forma macrogeométricos, conforme Fig. 2.18.

De forma geral os desvios de forma são divididos e dois grupos: macrogeométricos e microgeométricos. Os desvios macrogeométricos incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retitude, planeza, circularidade, entre outros e podem ser verificados por meio de sistemas de medição de baixo custo que usam relógios comparadores, máquinas de medir por coordenadas, máquinas de medir desvios de forma, entre outros.

Por sua vez, os desvios microgeométricos ou rugosidade são definidos como a soma das diferenças de forma de 3^a a 5^a ordens, que é resultado da ação inerente ao processo de usinagem. Essas diferenças de ordem são repetidas regularmente ou irregularmente, cujas distâncias são múltiplo reduzido de sua profundidade (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977). Esta definição destaca que a rugosidade é decorrente dos processos de usinagem. Assim uma definição mais abrangente é dada por Piratelli-Filho (2011), em que a

rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

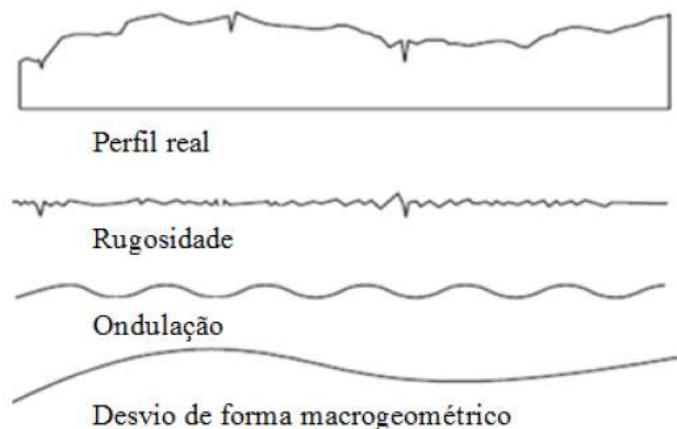


Figura 2.18 - Composição da superfície de acordo com a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

A Figura 2.19 mostra um exemplo do conjunto das irregularidades causado pela ferramenta de corte durante o processo de fabricação de uma peça, formados pelos sulcos ou marcas deixados pela ferramenta. Vale destacar que outros fatores como a profundidade de corte e o avanço da ferramenta influenciam a profundidade dos sulcos e o espaçamento entre eles, respectivamente.

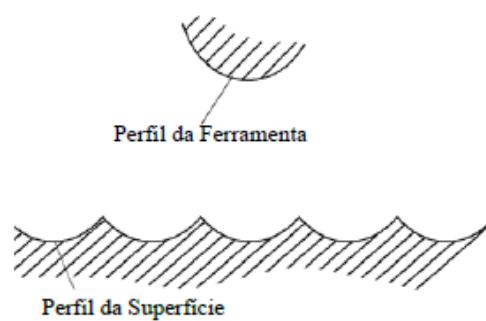


Figura 2.19 - Marcas feitas pela ferramenta na superfície (TAYLOR HOBSON, 2003).

Existem dois sistemas de medição para rugosidade: o da linha média e o da envolvente. Sendo o primeiro o mais utilizado e também o adotado no Brasil.

“Linha média: Linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem” (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977), Fig. 2.20.

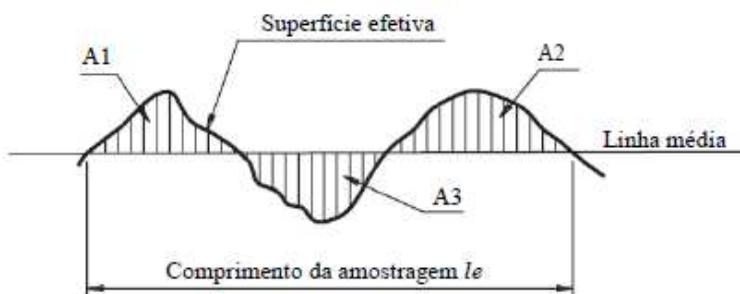


Figura 2.20 - Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

A partir do conceito de linha média a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) caracteriza três grupos de parâmetros geométricos que quantificam os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade, que são: parâmetros de amplitude – determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície; parâmetros de espaçamento – são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície; parâmetros híbridos – são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

Neste trabalho concentra-se a análise dos parâmetros de amplitude R_a - desvio aritmético médio do perfil avaliado, R_q - desvio médio quadrático do perfil avaliado, R_p - altura máxima do pico do perfil, R_v - Profundidade máxima do vale do perfil, R_t - altura total do perfil, R_k - rugosidade do núcleo do perfil, R_{pk} - região de pico, R_{vk} - região de vale e a relação R_p/R_t coeficiente de vazio - CV .

2.3.1. Métodos para medição de Rugosidade

A avaliação da rugosidade de forma detalhada e precisa requer a utilização de sistemas de medição desenvolvidos para essa finalidade, dentre os quais se destacam os rugosímetros, que podem ser eletromecânicos, ópticos e a laser, sendo o mais utilizado os equipamentos

eletromecânicos. Nos rugosímetros eletromecânicos uma ponta de diamante entra em contato com a superfície fornecendo o perfil de rugosidade ou uma topografia desta, definido como medição por contato. Seu princípio de funcionamento consiste da ponta do apalpador entrar em contato físico com a superfície a ser medida e um transdutor piezelétrico que converte o movimento vertical desta em um sinal elétrico.

Existem algumas limitações da medição da rugosidade com contato, são elas: impossibilidade de obter-se o perfil real devido às dimensões da ponta do apalpador; o contato da ponta pode provocar uma deformação elástica significativa da superfície medida, dependendo da pressão pode chegar a uma deformação plástica para materiais mais dúcteis.

2.3.2. Parâmetros de Rugosidade

Existem vários parâmetros que podem ser utilizado para quantificar e avaliar a rugosidade das peças, dentre eles tem-se:

- (R_a) - Desvio aritmético médio do perfil avaliado

Esse parâmetro é o mais utilizado para avaliar a rugosidade. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de $Z(x)$, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de amostragem (l_r), conforme Eq. (2.5). Trazendo para o lado geométrico, este parâmetro corresponde à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o comprimento de amostragem (l_r).

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^1 |Z(x)| dx \quad (2.5)$$

Esse parâmetro sozinho não é capaz de descrever totalmente uma superfície. Suas vantagens são: aplicável à maioria dos processos de fabricação; e riscos inerentes ao processo alteram pouco o valor. Como desvantagens podem ser citadas: presença de um pico ou vale atípico oriundo do processo não é identificado e pode ocultar defeitos; seu valor não define a forma das irregularidades e pode ser associado a diferentes processos; não distingue picos de vales.

- (R_q) - Desvio médio quadrático do perfil avaliado

Esse parâmetro é definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, $Z(x)$, no comprimento de amostragem (l_r), conforme Eq. (2.6).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.6)$$

O parâmetro bastante usado nos EUA acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média, evidenciando os picos e vales presentes na superfície.

O valor de Rq é, aproximadamente, 11 % maior que Ra . Esta diferença é importante naqueles casos em que a detecção de picos e vales se torna importante mesmo quando estes aparecem ao acaso. Assim, o parâmetro Rq evidencia os picos e vales, pois eleva ao quadrado o valor das ordenadas, acentuando-o.

- (Rp) - Altura máxima do pico do perfil

A altura máxima do pico do perfil (Rp) é a distância do pico máximo à linha média definido no comprimento de amostragem (lr), Fig. 2.21.

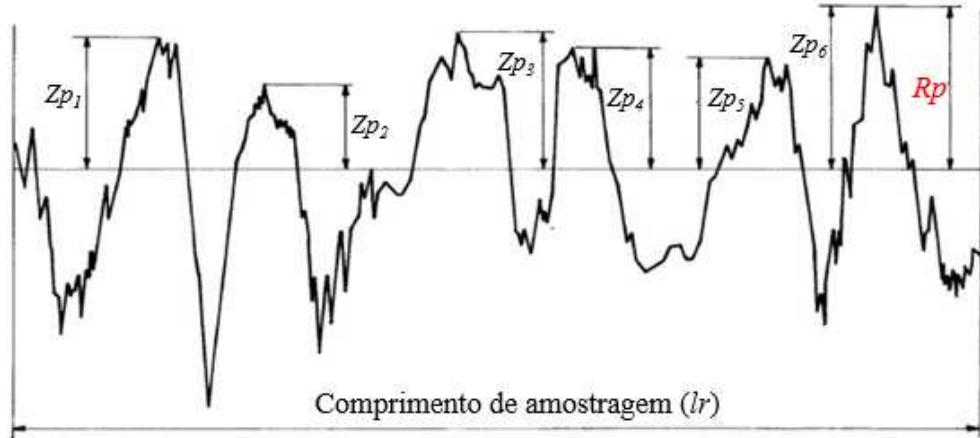


Figura 2.21 - Altura máxima do pico do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

- (Rv) - Profundidade máxima do vale do perfil

A profundidade máxima do vale do perfil (Rv) é a distância do vale máximo à linha média definido no comprimento de amostragem (lr), Fig. 2.22.

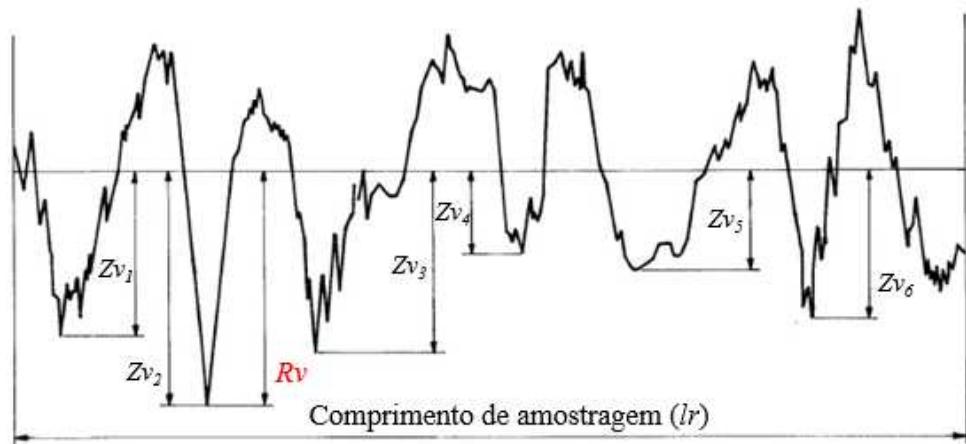


Figura 2.22 - Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

- (Rt) - Altura total do perfil

A altura total do perfil (Rt) é a soma das maiores alturas de pico e das maiores profundidades dos vales, definidos no comprimento de avaliação (ln) e não apenas no comprimento de amostragem (lr), de acordo com a ABNT NBR 4287 (ABNT, 2002). Este parâmetro informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça, Fig. 2.23.

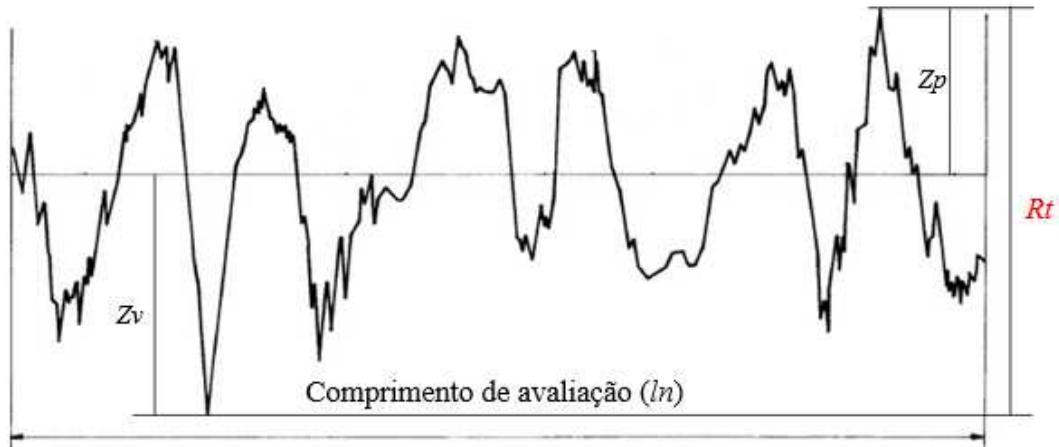


Figura 2.23 - Altura total do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

O parâmetro Rt informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça e tem grande aplicação na maioria dos países e fornecimento de informações complementares ao Ra (PIRATELLI-FILHO, 2011).

O Rt deve ser avaliado para superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, parafusos altamente carregados, superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico (PIRATELLI-FILHO, 2011).

De acordo com Smith et al. (2002), quando a forma das irregularidades é importante na aplicação da superfície usinada, os parâmetros de amplitude não devem ser tomados de forma isolada e, normalmente, devem ser interpretados conjuntamente com outros parâmetros do perfil avaliado, pois assim os resultados apresentam uma boa correlação nas propriedades tribológicas de superfícies.

Além dos parâmetros de rugosidade apresentados, neste trabalho será obtida a curva de *Abbott-Firestone*. Esta curva é obtida a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade. Ela possui os limites entre 0 % e 100 %, Fig. 2.24.

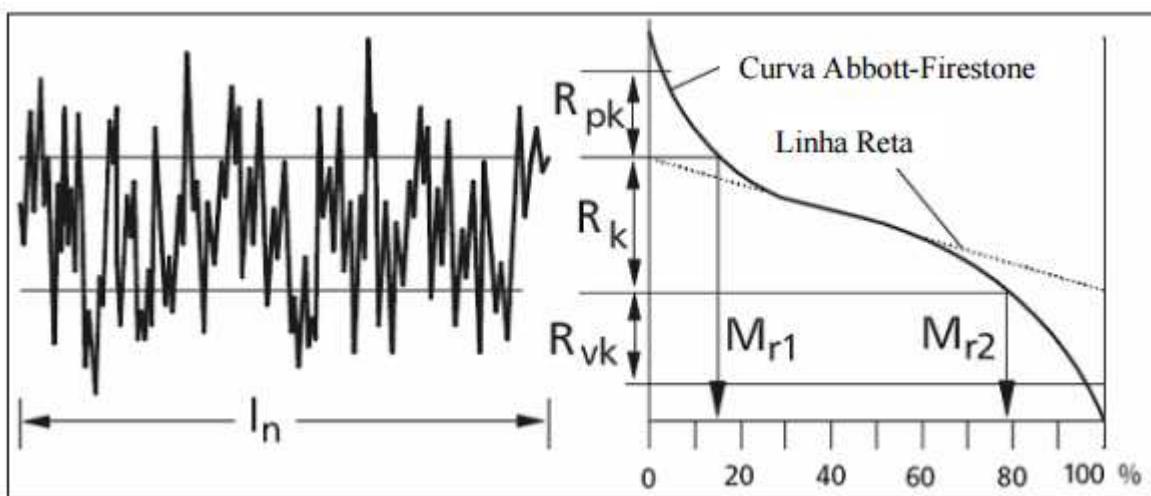


Figura 2.24 - Curva de *Abbott-Firestone* (TAYLOR HOBSON, 2000).

A curva de *Abbott-Firestone* é definida a partir de três parâmetros (Rk - rugosidade do núcleo do perfil, Rpk - região de pico e Rvk - região de vale) e duas fronteiras ($Mr1$ e $Mr2$) (JUNIOR, 2009).

O parâmetro Rk quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato e está associado à parte intermediária da rugosidade e que influência no desempenho de certas superfícies. Já o Rpk representa o valor da rugosidade média dos picos que estão acima da

área de contato mínima do perfil (excluídos eventuais picos exagerados), e está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies. Por outro lado, Rvk indica o valor da rugosidade média dos vales que estão abaixo da área de contato do perfil (excluídos eventuais vales excessivamente profundos), e está relacionado com a capacidade da superfície em reter algum tipo de fluido, sendo amplamente empregado na indústria automotiva e aeroespacial (TAYLOR HOBSON, 2000).

As fronteiras $Mr1$ e $Mr2$, dadas em porcentagem, representam a fração de contato mínimo e a fração de contato máximo, respectivamente, em que a primeira que determina a fração de contato mínima no núcleo do perfil de rugosidade, e a segunda determina a maior fração de contato no núcleo do perfil de rugosidade.

Para obter os índices Rpk e Rvk é necessário, determinar primeiramente o índice Rk . Para determinação deste parâmetro é traçada uma secante de menor inclinação possível sobre a curva de *Abbott-Firestone*, cuja porcentagem de suporte corresponde a 40 % (JUNIOR, 2009). O parâmetro Rk representa a diferença de altura entre a intersecção desta reta com o eixo de 100 % e o eixo de 0 %, enquanto os pontos $Mr1$ e $Mr2$ (%) correspondem à intersecção entre o perfil de referência e as retas paralelas ao eixo de porcentagem definindo o parâmetro Rk .

Os parâmetros Rpk e Rvk são definidos pela altura do triângulo reto da superfície equivalente às zonas de picos (base 0 % a $Mr1$) e aos vales (base $Mr2$ a 100 %).

Para o processo de brunimento, em particular, os parâmetros de rugosidade que melhor caracterizam o acabamento da superfície são: Rk (Rugosidade do núcleo do perfil- Serie); Rvk (Região de vale) e Rpk (Região de pico) e duas fronteiras ($Mr1$ e $Mr2$), os quais são definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone*. Entretanto, o parâmetro entre a relação Rp/Rt (coeficiente de vazio) também devem ser avaliados.

A combinação entre o Rp e Rt pode ser considerada como um dos parâmetros mais importantes para avaliar a evolução do desgaste da superfície, denominado como o coeficiente de vazio CV , determinado pela Eq. (2.7). Estes dois parâmetros não são abordados pelas normas técnicas atualmente em vigor no Brasil.

$$CV = \frac{Rp}{Rt} \quad (2.7)$$

2.3.3. Critérios para avaliar a rugosidade

Conforme mencionado anteriormente, os desvios de forma macrogeométricos se apresentam superpostos na superfície real da peça, sendo esses irrelevantes para a medição da rugosidade, e que devem ser filtrados para diminuir os erros de medição. A rugosidade possui altas frequências e baixa amplitude ao ser comparado com os desvios macrogeométricos, que possuem baixa frequência e alta amplitude, assim se faz necessário a utilização de filtros que permitam separar e atenuar os sinais com frequências mais baixas e para tanto, os rugosímetros utilizam filtros denominados Filtros Passa-alta.

As frequências de corte do filtro passa-alta são chamadas de *cut-off*, de forma que valores abaixo da frequência pré-determinada ou *cut-off* são eliminados.

No processo de medição da rugosidade é adquirido um conjunto de valores individuais do parâmetro de rugosidade avaliado para um comprimento de amostragem. Quando esse comprimento é requisito no processo de medição por apalpação, deve-se escolher o *cut-off* igual ao comprimento de amostragem. Não havendo essa especificação o *cut-off* deve ser escolhido considerando alguns fatores conforme mencionados na ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). Esta norma recomenda que a medição dos parâmetros de um perfil de rugosidade não periódico deve ser feita a partir de uma estimativa do comprimento de amostragem, baseada também na estimativa de um parâmetro do perfil de rugosidade desconhecido. A Tabela 2.4 mostra os valores de comprimento de amostragem para o *Ra*.

Tabela 2.4 - Comprimentos de amostragem (ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008)).

<i>Ra</i> (μm)	Comprimento de amostragem (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
$(0,006) < \text{Ra} \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < \text{Ra} \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < \text{Ra} \leq 2$	0,8	4,0
$2 < \text{Ra} \leq 10$	2,5	12,5
$10 < \text{Ra} \leq 80$	8	40

No caso de um perfil de rugosidade periódico parte-se de uma estimativa gráfica do parâmetro *RSm*, da superfície com rugosidade desconhecida, e com a Tabela 2.5 determina-se o comprimento de onda *cut-off* recomendado.

Tabela 2.5 - Comprimentos de amostragem para perfis periódicos (ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008)).

RSm (mm)	Comprimento de amostragem (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4,0
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Durante a avaliação da rugosidade com rugosímetros eletromecânicos, devem ser apalpados sete comprimentos de amostragem, sendo que a coleta dos dados é efetuada em cinco comprimentos de amostragem, denominados comprimento de avaliação, conforme Fig. 2.25.

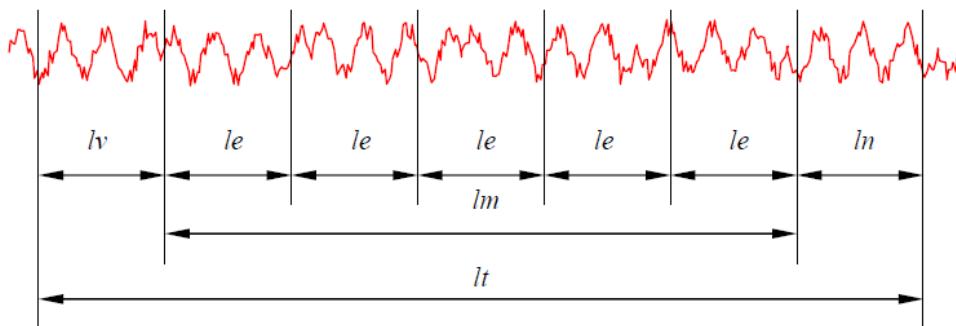


Figura 2.25 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994). Modificada

Onde:

le : cut-off;

lm : comprimento do percurso de medição;

lt : comprimento total de medição

lv : comprimento para atingir a velocidade de medição

ln : comprimento para parada do apalpador

2.4. Incerteza de medição

O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda tão somente uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

A incerteza associada ao resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando (BIPM et al, 2008a). É definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (INMETRO, 2012).

Sem a indicação da incerteza os resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência declarados em especificações do fabricante, catálogos ou normas técnicas (BIPM et al, 2008a).

O documento *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM) publicado pela ISO em 1993, surgiu com o objetivo de padronizar os procedimentos de avaliação e de expressão da incerteza de medição. Este guia apresenta critérios e regras gerais para expressar e combinar as incertezas individuais que afetam o processo de inspeção e, assim, determinar a incerteza de medição. A versão mais recente deste documento (JCGM 100) data de 2008 (BIPM et al, 2008a), a qual foi traduzida e publicada pelo INMETRO em 2012 sob o título “Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008” (INMETRO 2012a).

De forma geral, a metodologia proposta no JCGM 100 pode ser dividida nas seguintes etapas:

- definição do mensurando ou variável de saída;
- identificação das variáveis que podem afetar o resultado da medição (variáveis de entrada ou grandezas de influência);
- expressão do mensurando (variável de saída) em função das variáveis de influência, através de um modelo matemático;
- avaliação da incerteza-padrão associada às variáveis de entrada;
- avaliação da incerteza-padrão combinada associada à variável de saída;
- avaliação da incerteza expandida associada à variável de saída;
- expressão do resultado de medição.

A seguir é apresentado um breve detalhamento de cada uma das etapas.

2.4.1. Definição do mensurando

Toda medição tem como objetivo a determinação do valor do mensurando. Desta forma, o mensurando deve ser definido de forma completa, o que significa que para um nível de exatidão determinado, seu valor é único. Além da clara definição do mensurando, resulta necessário especificar o método de medição e o procedimento de medição a ser adotado.

2.4.2. Identificação das grandezas de influência

Na etapa inicial do cálculo da incerteza devem ser identificadas todas as grandezas de influência (BIPM et al, 2008a). Para tanto, deve-se realizar uma análise criteriosa a fim de identificar todas as componentes de incerteza. Tais componentes podem estar relacionadas às condições ambientais, ao operador, aos equipamentos e padrões utilizados, ao método de medição, dentre outros fatores.

A quantidade e o tipo de componentes variam de acordo com o sistema de medição, com o tipo de mensurando analisado e com o nível de exatidão requerido. Assim sendo, o operador deve conhecer o princípio de funcionamento do sistema de medição utilizado, as principais fontes de erros na medição em curso, bem como o procedimento de medição. Ainda, deve ser efetuada a interpretação do certificado de calibração e retirar do mesmo as informações mais relevantes para o cálculo da incerteza. Outros documentos, tais como manuais e especificações de fabricantes, também devem ser consultados e analisados.

A identificação das variáveis de influência assume importância ímpar na avaliação da incerteza de medição, sendo considerada uma etapa crítica do processo. Muitos operadores nem sequer conseguem iniciar o cálculo da incerteza porque não são capazes de identificar os possíveis fatores de influência presentes na medição. Isto se justifica, principalmente, pela falta de conhecimento sobre o sistema e o processo de medição. Pode ser acrescentado que, na prática, existem muitas fontes que podem contribuir para a incerteza final em uma medição, dificultando a identificação das mesmas.

2.4.3. Obtenção do modelo matemático

Identificadas as variáveis de influência, um modelo matemático, descrevendo o processo de medição, deve ser proposto, pois ele é a base para a aplicação da lei de propagação de incertezas (BIPM et al, 2008a). Este modelo relaciona todas as variáveis de

influência (variáveis de entrada) do processo de medição com o mensurando (variável de saída). Essa função é dada pela Eq. (2.8).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.8)$$

Onde: Y: variável de saída; e X_i : variáveis de entrada.

A partir da Eq. (2.8) pode-se obter também uma estimativa do mensurando (Y), designada como (y), tendo como base um conjunto de estimativas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N) para os valores das (N) grandezas (X_1, X_2, \dots, X_N). Assim, a expressão resultante é dada pela Eq. (2.9):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.9)$$

2.4.4. Avaliação da incerteza-padrão

A incerteza-padrão (u) das grandezas de influência é obtida através da análise individual de cada uma delas. Dependendo da quantidade de informação disponível sobre estas grandezas e da forma como ela é apresentada, as componentes da incerteza são classificadas em dois tipos, a saber: avaliação do Tipo A e avaliação do Tipo B (BIPM et al, 2008a).

Segundo o JCGM 100 (BIPM et al, 2008a) uma avaliação da incerteza-padrão do Tipo A é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal, Fig. 2.26, ou outra qualquer.

Uma componente de incerteza obtida por uma avaliação do Tipo A é caracterizada por um desvio-padrão que considera as flutuações aleatórias, além das influências consideradas constantes, dos resultados de um dado experimento.

A melhor estimativa do valor do mensurando é aquela obtida através da média aritmética de (n) observações repetidas do mesmo mensurando (BIPM et al, 2008a).

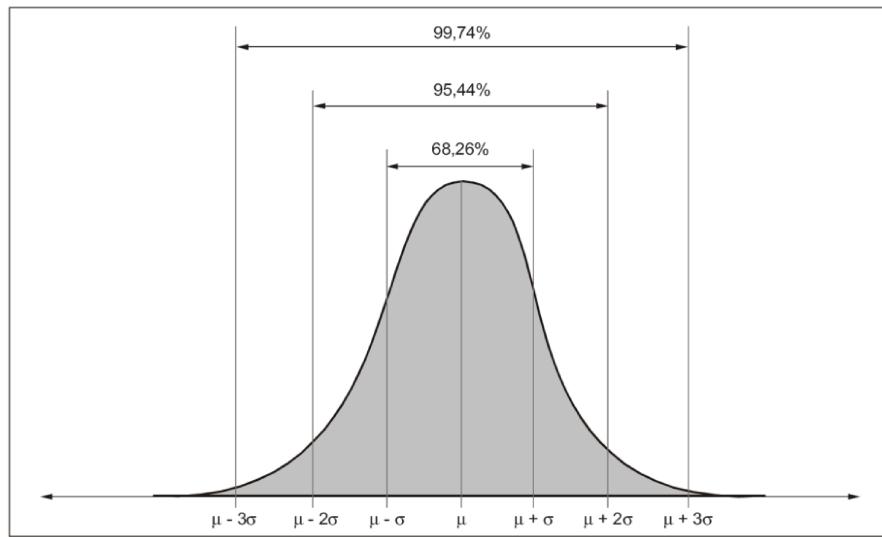


Figura 2.26 - Distribuição normal.

O desvio-padrão experimental da média é, neste caso, uma medida da incerteza associada ao valor da média. Para medições efetuadas em condições de repetibilidade, o desvio-padrão experimental indica a repetibilidade da medição e pode ser calculado pela Eq. (2.10).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.10)$$

Onde: $u(x)$: incerteza-padrão da variável (x); s : desvio-padrão experimental; n : número de elementos da amostra.

A avaliação da incerteza-padrão do Tipo B de uma componente de incerteza é obtida por outros meios, que não a análise estatística de uma série de observações repetidas, tais como considerações de manuais, especificações de fabricantes, certificados de calibração ou a partir de experiências anteriores. Dependendo da quantidade de informação disponível e da forma como ela é apresentada, podem-se adotar diferentes distribuições de probabilidade para efetuar os cálculos. A seguir, são apresentadas e discutidas as mais utilizadas.

Distribuição retangular: A distribuição retangular mostrada na Fig. 2.27, é utilizada quando é possível estimar apenas os limites inferior e superior para a variável (X_i), e estabelecer que a probabilidade do valor (X_i) pertencer ao intervalo ($a-$, $a+$) é 1 (um) e a

probabilidade do valor (X_i) estar fora desse intervalo é 0 (zero). Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de (X_i) dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que (X_i) esteja em qualquer ponto do intervalo. Como neste intervalo podem ser encontrados infinitos valores de (X_i), consequentemente, o seu grau de liberdade é infinito.

Na Figura 2.27 observa-se que a distribuição de probabilidade retangular, com largura ($\pm a$) possui probabilidade de abrangência de 100 %, pois abrange o intervalo com todos os possíveis valores da variável em questão. Esse intervalo é denominado de intervalo de abrangência. Um exemplo clássico de variável com distribuição retangular é a resolução do sistema de medição.

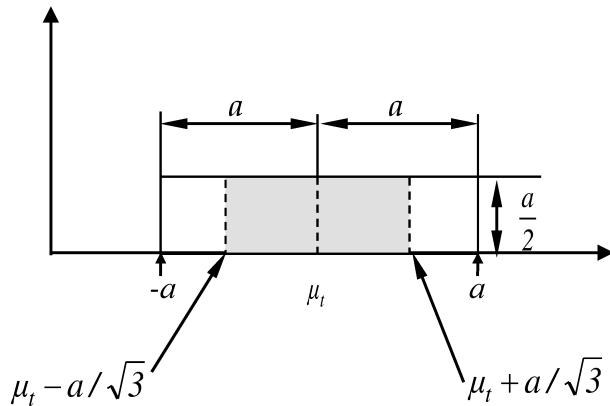


Figura 2.27 - Distribuição retangular (BIPM et al, 2008a). Modificada.

Para transformar essa componente de incerteza ($\pm a$) em uma incerteza-padrão com abrangência de 68,27 %, deve-se dividir (a) por 3,00 (três). Neste caso, o 3,00 (três) é chamado de divisor. Um exemplo clássico de variável com distribuição retangular é a resolução do sistema de medição.

Distribuição triangular: Em muitas situações há disponível maior quantidade de informação sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, sendo adequado esperar que valores perto do ponto médio sejam mais prováveis. Nestes casos, a distribuição retangular simétrica deve ser substituída por uma distribuição trapezoidal simétrica ou por uma distribuição triangular simétrica, apresentada na Fig. 2.28, com infinitos graus de liberdade.

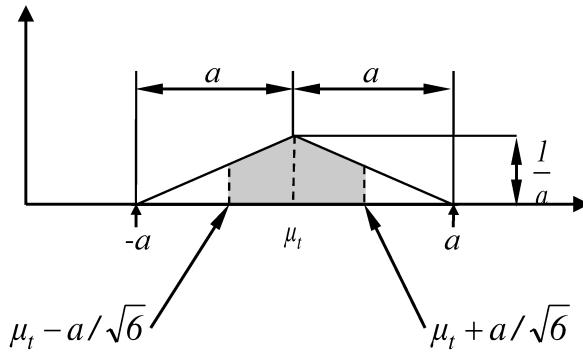


Figura 2.28 - Distribuição triangular (BIPM et al, 2008a). Modificada.

A incerteza-padrão associada a uma grandeza do Tipo B com distribuição triangular é expressa pela Eq. (2.11).

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.11)$$

Observe na Figura 2.28 que para transformar essa componente de incerteza ($\pm a$) em uma incerteza-padrão com abrangência de 68,27 %, o parâmetro (a) foi dividido por 6 (seis).

Distribuição normal ou T-Student: Quando a incerteza de uma fonte de entrada (x_i) provém de um certificado de calibração a estimativa da incerteza-padrão pode ser efetuada por meio de uma avaliação do Tipo B.

No certificado de calibração, geralmente, são declaradas outras informações como a probabilidade, o fator de abrangência (k) e o número de graus de liberdade efetivos. Desta forma, a incerteza-padrão pode ser determinada pela Eq. (2.12).

$$u(x_i) = \frac{U(\text{Cal.})}{k} \quad (2.12)$$

Onde: $U(\text{Cal.})$: incerteza expandida declarada no certificado de calibração; e k : fator de abrangência declarado no certificado de calibração.

A adoção de uma distribuição normal ou *T-Student* depende do número de leituras (*n*) efetuadas durante a medição. Para *n*>30 utiliza-se a distribuição normal, caso contrário adota-se a distribuição *T-Student*. Neste caso, são considerados os graus de liberdade efetivos declarados no certificado, ou aqueles correspondentes ao valor de (*k*) especificado.

2.4.5. Avaliação da incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão combinada da variável de saída é obtida aplicando a lei de propagação de incertezas, apresentada na Eq. (2.13).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.13)$$

Onde: $u_c(y)$: incerteza-padrão combinada da variável de saída; e $r(x_i, x_j)$: coeficiente de correlação entre as estimativas (x_i) e (x_j).

No primeiro termo da Eq. (2.13), $u(x_i)$ é a incerteza-padrão de cada grandeza de entrada (x_i), e as derivadas parciais da função em relação à cada variável de entrada são os coeficientes de sensibilidade, cuja magnitude representa a contribuição de cada fonte de incerteza no valor da incerteza total.

O segundo termo da Eq. (2.13) só irá existir quando houver uma correlação entre as grandes de entrada (x_i) e (x_j), ou seja, quando $r(x_i, x_j) \neq 0$. Caso contrário, o segundo termo desaparece, obtendo-se a Eq. (2.14).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.14)$$

Desta forma resulta necessário avaliar a correlação entre as variáveis de entrada.

Estimadas as incertezas-padrão das fontes de entrada ($u(x_i)$) é necessário calcular os coeficientes de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada. O coeficiente de sensibilidade (c_i) do mensurando (y) em relação a cada fonte de entrada (x_i) é definido como:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

Os coeficientes de sensibilidade descrevem a contribuição de cada fonte de incerteza no valor final da incerteza de medição. Em outras palavras, descrevem como a estimativa de saída (y) varia com alterações nos valores das estimativas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N). Estes coeficientes servem, ainda, como fatores de conversão de unidades de medida, convertendo a incerteza-padrão de cada variável ($u(x_i)$), para a mesma unidade de medida do mensurando (Y). O produto da incerteza-padrão ($u(x_i)$) e seu respectivo coeficiente de sensibilidade origina a chamada contribuição de incerteza ($u_i(y)$), que corresponde a uma medida de dispersão equivalente a um desvio-padrão, com a mesma unidade de medida do mensurando.

Quando o modelo matemático da medição é o resultado da soma algébrica de um conjunto de variáveis, os coeficientes de sensibilidade serão todos iguais a um. Caso haja subtração, o sinal do coeficiente será negativo.

2.4.6. Avaliação da incerteza expandida

Ao aplicar o Teorema do Limite Central para determinação da incerteza-padrão combinada ($u_c(y)$) pode-se dizer que a distribuição de probabilidade resultante será, sempre, aproximadamente normal ou *T-Student*, para um dado número de graus de liberdade (v_{ef}).

Sabe-se que para uma distribuição de probabilidade normal, o intervalo dado por $[\bar{x} - s; \bar{x} + s]$ (onde \bar{x} é a melhor estimativa do mensurando) possui probabilidade de abrangência de 68,27 %. Para aumentar tal probabilidade de abrangência, deve-se multiplicar a incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência k , conforme mostra a Eq. (2.16). Como resultado obtém-se a chamada incerteza expandida $U(y)$ relativa à variável de saída y que usualmente é declarada quando apresentado o resultado da medição conforme requisitado pela ABNT ISO IEC 17025 (ABNT, 2005).

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (2.16)$$

O cálculo do grau de liberdade efetivo da incerteza-padrão combinada da variável de saída é baseado na equação de Welch-Satterthwaite, conforme mostra a Eq. (2.17) (BIPM et al, 2008a).

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i(x_i))^4}{v_i}} \quad (2.17)$$

Onde: $u_c(y)$: incerteza-padrão combinada da variável de saída; $u(y_i)$: incerteza-padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída; v_i : número de graus de liberdade de cada variável de entrada; N : número de variáveis de entrada; $u(x_i)$: incerteza-padrão de cada variável de entrada; e $c_i(x_i)$: coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada (x_i).

2.4.7. Apresentação do resultado de medição

O resultado da medição deve ser expresso em concordância com a ABNT NBR ISO IEC 17025 (ABNT, 2005). Desta forma, levando-se em conta a incerteza-padrão combinada, é dado por $\bar{y} \pm u_c(y)$ e, em relação à incerteza expandida, é expresso por $\bar{y} \pm U(y)$, em que (\bar{y}) é a estimativa de (Y) , representado por seu valor médio.

O valor numérico da estimativa do mensurando (\bar{y} : média das (n) indicações) deve ser arredondado considerando o mesmo número de casas decimais da resolução do sistema de medição. Neste caso, as regras usuais de arredondamento devem ser utilizadas. Entretanto, ao relatar os resultados finais da avaliação da incerteza de medição ($u_c(y)$ e $U(y)$) às vezes pode não ser apropriado utilizar tais regras de arredondamento. Neste sentido, o JCGM 100 (BIPM et al, 2008a) destaca que o bom senso deve prevalecer.

2.5. Planejamento de Experimentos

Experimento é definido como um teste, ou um conjunto deles, em que há mudanças propositais em algumas características do processo, para observar e identificar as razões das mudanças observadas em uma variável resposta. Mason, Gunst e Hess (2003) compreendem a variável de resposta como uma observação do experimento.

O controle estatístico de processos (CEP) e o planejamento experimental são ferramentas importantes na busca da otimização dos processos experimentais. O planejamento experimental é um método estatístico ativo, pois realizam-se diversos ajustes no processo e

nas variáveis de entrada, observando-se as mudanças correspondentes na variável de saída. O sucesso de um planejamento experimental é fortemente correlacionado com sua estruturação e com sua execução. Entender claramente quais são os objetivos de realizar um experimento é necessário antes de qualquer ação para executá-lo (MONTGOMERY, 2004).

Segundo Montgomery (2004), as técnicas de planejamento experimental são utilizadas a fim da melhoria das características de qualidade dos produtos e processos, para reduzir a quantidade de testes e para otimizar o uso dos recursos materiais e pessoais. Button (2012) agrupa alguns objetivos secundários, como a identificação de variáveis do processo e a atribuição de valores às variáveis influentes do processo, minimizando a variabilidade da resposta de interesse e os efeitos das variáveis não controladas.

De maneira sintética, a experimentação, objetiva obter a relação de causa e efeito entre a variável resposta, ou saída, e as variáveis de entrada de um processo. A Figura 2.29 mostra um esquema deste processo, onde as variáveis de entrada controladas (x_1, x_2, \dots, x_n) podem ser compreendidas como uma combinação de máquinas, métodos, procedimentos, pessoas ou outros tipos de recursos que transformam a entrada em saída. As variáveis não controláveis (z_1, z_2, \dots, z_n) são características experimentais não controladas pelo desconhecimento de sua existência ou pela inviabilidade de controle das mesmas (MONTGOMERY, 2009).

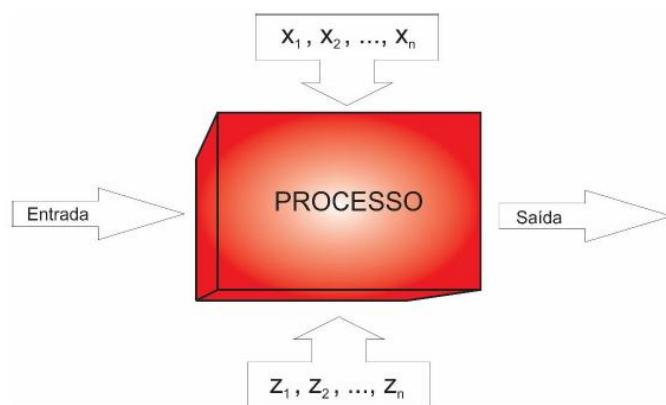


Figura 2.29 - Representação de um modelo geral de processo.

Existem diversos tipos de planejamento experimental, dentre eles, os sistemas de planejamento fatorial se destacam ao permitirem avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis, a partir de um número reduzido de ensaios experimentais,

quando comparados aos processos univariados (PERALTA-ZAMORA et al., 2005; BARROS NETO et al., 1996).

Dentre as diversas vantagens da utilização do planejamento fatorial, destacam-se as seguintes (BUTTON, 2005):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, em um processo interativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

2.5.1. Princípios básicos do planejamento de experimentos

O planejamento adequado para a coleta de dados só é possível se princípios básicos do planejamento de experimentos forem conhecidos.

O primeiro trata-se de réplicas ou repetições do experimento realizado sob as mesmas condições experimentais, o que permite a quantização do erro experimental. Os métodos estatísticos requerem que os erros sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente. Segundo trata-se da aleatoriedade dos experimentos, que devem ser realizados de forma aleatória, a fim de garantir a distribuição equânime de todos os fatores desconhecidos e/ou não considerados. Em terceiro, e por fim, a formação de blocos, que é uma técnica de extrema importância com objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em alguns processos pode-se controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos que perturbam acrescentando pequenas variações no sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los (NETO et al., 2001).

2.5.2. Roteiro experimental

Para a elaboração de um roteiro para a realização de experimentos deve-se ter conhecimento de forma clara do que será estudado, da forma como serão coletados os dados e uma previsão dos resultados.

Um roteiro para a realização de um bom experimento é apresentado a seguir: reconhecimento e relato do problema, escolha dos fatores e dos níveis, escolha da variável resposta, escolha do planejamento experimental, realização do experimento, análise dos dados, ao fim as conclusões e recomendações.

2.5.3. Análise de Variância

A análise de variância é uma ferramenta muito útil para a tomada de decisão, quanto à influência de um determinado tratamento sobre o resultado, sem a necessidade de julgamento subjetivo do avaliador. Sendo assim, essa técnica estatística permite avaliar afirmações sobre as médias de populações, buscando verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente.

As premissas fundamentais da análise de variância são: amostras aleatórias e independentes, populações terem distribuição normal e as variâncias populacionais serem iguais. Na prática, ocorre a não necessidade de todas satisfazer todas as premissas, pois os resultados são empiricamente verdadeiros sempre que as populações possuem distribuição e variâncias próximas da normal (MILONE, 2009).

A ANOVA faz duas etapas sendo o teste de Hipótese e a distribuição de probabilidade Fisher-F com nível de significância determinado, geralmente $\alpha = 5\%$.

As hipóteses nula e alternativa da análise a serem testadas na ANOVA são:

- Hipótese nula (H_0): as médias populacionais são iguais
- Hipótese alternativa (H_1): as médias populacionais são diferentes, ou seja, garante que pelo menos uma das médias é diferente das demais.

Então, faz-se o cálculo de p -valor que é uma estatística para sintetizar o resultado de um teste de hipótese, definido como a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema àquela observada em uma amostra, assume-se verdadeira a hipótese nula. Se o p -valor for menor que α , rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 e se pode inferir que há uma diferença sistemática atuando na resposta, indicando que existe diferença entre os valores amostrais. A rejeição de H_0 leva a conclusão que as médias diferem do ponto estatístico. Caso contrário, não rejeita a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, conclui-se que não há evidências estatísticas de diferenças significativas entre as médias, ao nível α de significância escolhido.

Por se tratar de um teste conhecido, inúmeros programas computacionais ou *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas que fazem todos os cálculos automaticamente.

Para um conjunto amostral de dados experimentais (s^2) a expressão matemática para o cálculo da variância abrange a razão entre a soma dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média (y) de todos os dados (SQT) e o número total de graus de liberdade (GLT), conforme mostram as Eqs. (2.18) e (2.19).

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \left(y_{ij} - \bar{y} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$s^2 = \frac{SQT}{GLT} \quad (2.19)$$

Após, torna-se possível desmembrar a variância s^2 a partir da soma de quadrados total (SQT) adicionando-se e subtraindo-se a média amostral da Eq. (2.18), pode-se demonstrar que as duas somas de quadrados resultam como nas Eqs. (2.20) e (2.21) as quais representam os desvios dentro e entre as amostras.

$$SQ_{\text{dentro}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \left(y_{ij} - \bar{y}_l \right)^2 \quad (2.20)$$

$$SQ_{\text{entre}} = \sum_{i=1}^k \left(\bar{y}_l - \bar{y} \right)^2 \quad (2.21)$$

Dividindo-se as somas de quadrados pelos respectivos números de graus de liberdade, obtêm-se as estimativas das variâncias entre e dentro das amostras. Tais estimativas são os quadrados médios.

O número de graus de liberdade entre as amostras é igual ao número de amostras menos um ($k-1$) e o número de graus de liberdade dentro da amostra é igual ao número de amostras (k) vezes o número de réplicas (r) por amostra menos um ($k(r-1)$). O número de graus de liberdade dentro das amostras é calculado pela diferença entre o número de graus de liberdade total ($N-1$) e o número de graus de liberdade entre as amostras ($k(r-1)$).

O resíduo ou erro experimental é o quadrado médio que representa a variação dentro das amostras. E para a análise dos resíduos as suposições partem das premissas de normalidade, independência e igualmente definidos.

A comparação de valores de quadrados médios é realizada considerando e admitindo-se uma hipótese inicial H_0 de que as médias obtidas nas amostras são iguais ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$). Quando o quadrado médio entre amostras apresenta um valor bem superior ao quadrado médio dentro das amostras, esta hipótese pode ser rejeitada, considerando a teoria das probabilidades com base na distribuição amostral da razão F de *Fisher Snedecor* entre duas variâncias.

Esta relação ou teste *F de Fisher* é a razão entre os quadrados médios, dada pela Eq. (2.22). Este valor de F é comparado com os valores de F tabelado em função do número de graus de liberdade das variâncias e do nível de confiança desejado, usualmente utiliza-se uma probabilidade de 95 %.

$$F_{1,2} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (2.22)$$

O valor de F tabelado é proveniente de uma distribuição de probabilidade da razão entre variâncias de duas amostras, extraídas aleatoriamente de uma mesma população com distribuição normal de variância σ^2 . Os resultados da análise de variância são apresentados através de um quadro, Tab. 2.3. Para que os resultados encontrados sejam validos, é necessário que os dados apresentem distribuição normal e que as variâncias dentro das amostras sejam aproximadamente iguais.

Tabela 2.6 - Quadro de ANOVA.

Fonte de variação (FV)	Soma de Quadrado (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Razão entre QM (F)
Entre (Efeito)	SQ_{entre}	(k-1)	QM_{entre}	$F = QM_{\text{entre}} / QMR$
Dentro (Resíduo)	SQ_{dentro}	k(r-1)	QMR	
Total	SQT	(N-1)		

Uma vez que é possível ajustar um modelo matemático por análise de regressão, estes pré-requisitos podem ser verificados pela análise gráfica dos resíduos. As conclusões extraídas em testes de hipótese, como o teste F das variâncias amostrais, estão baseadas em curvas de distribuição de probabilidade. Dois erros podem ser cometidos: erro tipo I e erro

tipo II. O tipo I é cometido quando a hipótese H_0 é verdadeira e o teste permite sua rejeição. A probabilidade de cometer este erro pode ser controlada pela seleção da confiança estatística desejada, na realização do teste de hipótese. De forma, se a confiança escolhida for 95 % a probabilidade de rejeição de uma hipótese verdadeira é de 5 %. O erro tipo II é cometido quando a hipótese H_0 é falsa e o teste permite sua aceitação. A probabilidade de se cometer este erro é designada por β e depende do tamanho da amostra, do desvio padrão amostral e do tamanho da diferença entre médias consideradas para rejeitar a hipótese de igualdade entre médias.

As componentes de variância podem ser determinadas através da análise de variância, desde que a(s) variável(is) seja(m) aleatória(s). A análise de variância pode ser utilizada para verificar o efeito de uma série de variáveis aleatórias, atuando ao mesmo tempo em um instrumento de medição, e estimar as componentes de variância de cada variável. A análise de variância permite ainda, concluir no grau de confiança estipulado, se existe ou não diferenças entre duas ou mais médias amostrais (MONTGOMERY, 2001).

Neste capítulo foi descrito toda a fundamentação teórica que será necessária para o desenvolvimento do presente trabalho. No capítulo seguinte é descrito, de forma detalhada a metodologia envolvida para coleta de dados, para realização do processo de brunimento flexível, para medição da rugosidade e para análise dos dados coletados.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para atendimento do objetivo proposto, qual seja o desenvolvimento e a geração de tecnologia para o brunimento de cilindros de blocos de compressores fabricados em ferro fundido vermicular para refrigeradores de uso doméstico. Para tanto foram propostas as seguintes etapas:

- Planejamento dos experimentos;
- Brunimento Convencional (BC) dos cilindros realizado pela EMBRACO;
- Medição da rugosidade após o Brunimento Convencional;
- Usinagem dos cilindros utilizando o Brunimento Flexível após o BC (BC+BF);
- Avaliação dos parâmetros de rugosidade após o Brunimento Flexível.

Todas as etapas foram realizadas em 30 (trinta) cilindros de blocos de compressores herméticos, os quais foram identificados de forma aleatória com números de 1 (um) a 30 (trinta) permitindo assim a fácil identificação, bem como a comparação dos resultados após ambas operações de usinagem. Os blocos foram inicialmente usinados pelo brunimento convencional com a ferramenta precidora pela empresa EMBRACO, procedimento realizado em sua linha de produção.

Neste trabalho, foi realizado o brunimento flexível dos cilindros em uma máquina fresadora CNC, utilizando a ferramenta brunidora flexível que é composta por uma haste metálica central em que são fixadas cerdas de nylon com lóbulos impregnados de abrasivos nas pontas.

A avaliação da qualidade geométrica do cilindro foi efetuada após o brunimento convencional e após o brunimento flexível, por meio da avaliação de diversos parâmetros de rugosidade, bem como de perfis de rugosidade e de curvas de *Abbott-Firestone*.

3.1. Planejamento dos experimentos

Objetivando investigar o efeito das variáveis granulometria e número de golpes da ferramenta nos valores dos parâmetros de rugosidade: Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rk , Rvk , Rpk , $Mr1$, $Mr2$ e CV de blocos de compressores herméticos brunidos pelo brunimento flexível aplicado após o brunimento convencional foi proposto um planejamento fatorial completo 2^1 e 3^1 . A granulometria da ferramenta foi investigada em dois níveis: 400 *mesh* e 800 *mesh*, e o número de golpes da ferramenta em três níveis: 1, 3 e 5 golpes.

A Tabela 3.1 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial completo proposto e os blocos correspondentes de cada experimento.

Tabela 3.1 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo 2^1 e 3^1 .

Experimento	Fator 1 Granulometria (<i>mesh</i>)	Fator 2 Número de golpes	Blocos
1	-1 (400)	-1 (1)	30, 29, 28, 27, 26
2	+1 (800)	-1 (1)	05, 04, 03, 02, 01
3	-1 (400)	-0 (3)	25, 24, 23, 22, 21
4	+1 (800)	-0 (3)	10, 09, 08, 07, 06
5	-1 (400)	+1 (5)	20, 19, 18, 17, 16
6	+1 (800)	+1 (5)	15, 14, 13, 12, 11

De acordo com a matriz de planejamento foram executados 6 (seis) testes. Para cada teste foram efetuadas cinco réplicas. Sendo assim, tem-se um total de 30 testes, sendo necessária a avaliação de 30 blocos de compressores herméticos numerados de forma aleatória de 1 a 30.

De acordo com Pereira et al., (2018), cada golpe da ferramenta no cilindro consistiu em quatro movimentos, sendo dois no sentido horário (um de avanço e um de recuo) e dois no anti-horário (um de avanço e um de recuo), conforme a Fig. 3.1.

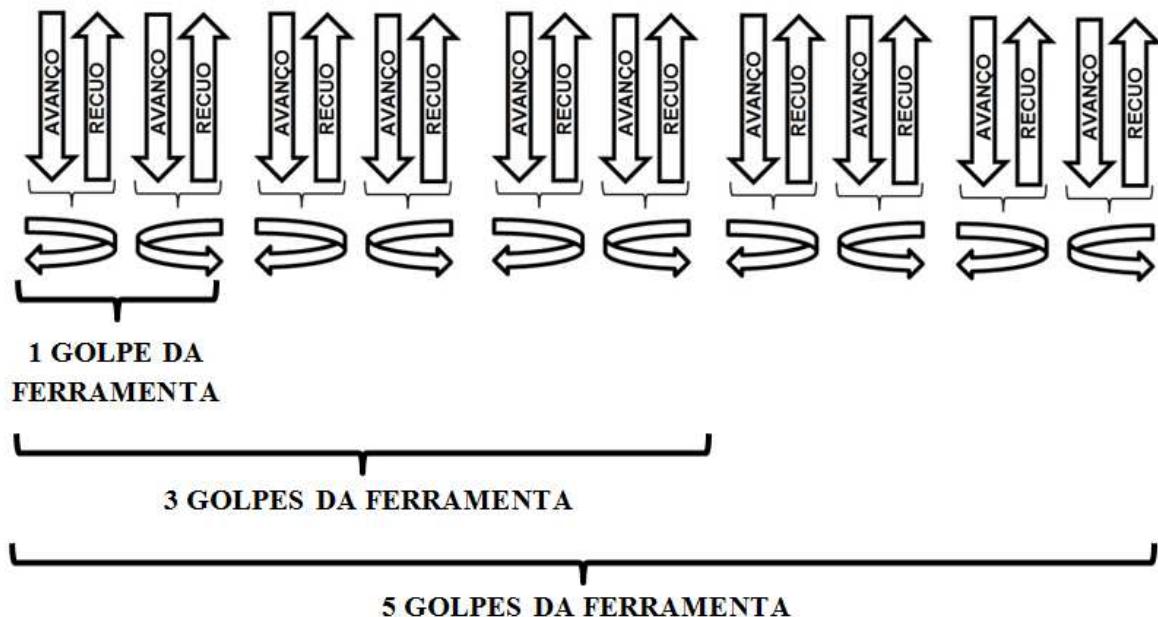


Figura 3.1 - Representação esquemática do número de golpes da ferramenta utilizados no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores (PEREIRA et al., 2018) Modificada.

O tratamento dos dados foi efetuado utilizando a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* Statistica 7.0. O objetivo da aplicação desta técnica foi o de identificar quais os fatores que produzem efeitos com confiabilidade estatística nas variáveis de resposta, bem como identificar se existe interação entre os fatores. Os resíduos também foram verificados através do gráfico de distribuição de probabilidade normal.

3.2. Brunimento convencional

O brunimento convencional dos 30 (trinta) cilindros de blocos de compressores herméticos foi realizado na linha de produção da planta brasileira da empresa EMBRACO, cujos parâmetros de corte foram pré-estabelecidos pela empresa e são apresentados na Tab. 3.2.

A usinagem dos cilindros foi realizada em uma máquina brunidora vertical multifuso, do fabricante Gehring, executando três operações de usinagem em ordem, cada operação são

efetuados dois golpes utilizando um conjunto dos três brunidores, sendo um de desbaste (120 *mesh*), um de semi-acabamento (270 *mesh*) e um de acabamento (600 *mesh*) (FERNANDES, 2014).

Tabela 3.2 - Parâmetros de corte para brunimento convencional (FERNANDES, 2014).

Rotação (rpm)	Brunidor de desbaste: 550
	Brunidor de semi-acabamento: 550
	Brunidor de acabamento: 500
Profundidade de corte (mm)	0,014
Velocidade de avanço (mm/min)	300

Outras informações referentes ao brunimento convencional são de sigilo da empresa, e por isso, não são apresentadas neste trabalho.

3.3. Avaliação da rugosidade do cilindro

A medição da rugosidade do cilindro dos blocos dos compressores herméticos foi realizada no Laboratório de Ensino em Metrologia (LEMETRO) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente de $20,0 \pm 1,0$ °C, visando atender as recomendações da ABNT NM-ISO 1 (ABNT, 1997). Durante os experimentos a temperatura foi monitorada por meio de um termo higrômetro digital modelo HT-260 da Instrutherm com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de (-20,0 a 60,0) °C. O termo higrômetro possui certificado de calibração N. R4996/13 e foi emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação (ANEXO I). Para a temperatura a incerteza expandida é de 0,3 °C para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade. Todas as peças, dispositivos e sistemas de medição foram deixados no mesmo ambiente de medição durante doze horas à temperatura padrão para atingirem o equilíbrio térmico.

A medição da rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro portátil Surtronic 3+, do fabricante Taylor Hobson, modelo 112/1590, com resolução de 0,01 µm e que possui um apalpador com ponta de diamante com raio de ponta de 2 µm, Fig. 3.2. O rugosímetro possui certificado de calibração (ANEXO II), com n° 0001/2016 emitido pelo LEMETRO. Este

certificado declara uma incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro de 0,02 μm para k igual a 2,23 e probabilidade de abrangência de 95 %. O rugosímetro foi ligado 3 horas antes do inicio da medição.

Conforme recomenda a ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), para avaliação da rugosidade do cilindro do bloco do compressor, foi adotado o comprimento de amostragem l_r ou *cut-off* de 0,8 mm e foi utilizado o filtro Gaussiano para retirada das ondulações do perfil. Cinco comprimentos de amostragem foram considerados durante a medição perfazendo um percurso de avaliação de 4,0 mm.

Para minimizar o efeito da vibração mecânica transmitida pelo solo, o rugosímetro e o bloco foram posicionados sobre a mesa de desempenho de medição da máquina de medir por coordenadas (MMC), como mostra a Fig. 3.2. O bloco foi fixado na mesa da máquina utilizando um conjunto de dispositivos dedicados a este fim.

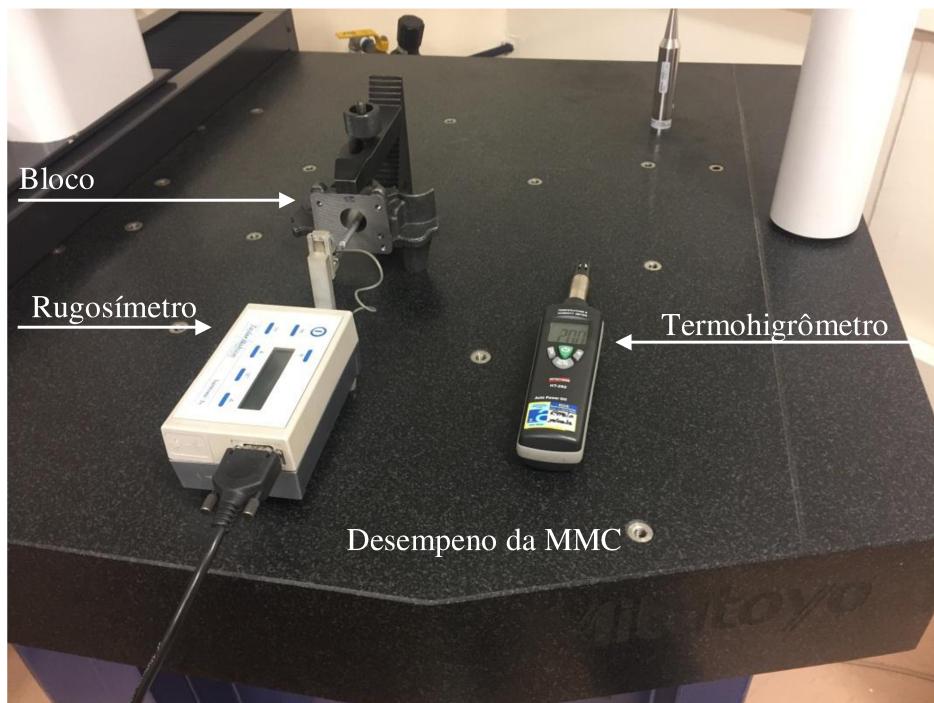


Figura 3.2 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson, termohigrômetro HT-260 da Instrutherm e bloco posicionados no desempenho da MMC.

A rugosidade de cada peça foi medida cinco vezes e os seguintes parâmetros de rugosidade foram coletados:

- R_a (desvio aritmético médio do perfil);
- R_q (desvio médio quadrático do perfil);

- R_p (altura máxima do pico do perfil);
 - R_v (profundidade máxima do vale do perfil);
 - R_t (altura total do perfil);
 - R_k (rugosidade do núcleo do perfil);
 - R_{pk} (região de pico);
 - R_{vk} (região de vale);
 - CV (coeficiente de vazio).
- $Mr1$ (fração de contato mínimo no núcleo do perfil de rugosidade);
 - $Mr2$ (fração de contato máximo no núcleo do perfil de rugosidade);

Também foram obtidos o perfil de rugosidade e a curva de *Abbott-Firestone*.

A Figura 3.3 mostra um bloco do compressor fixado na mesa de medição da MMC. A seta branca indica onde a medição da rugosidade do cilindro foi efetuada.

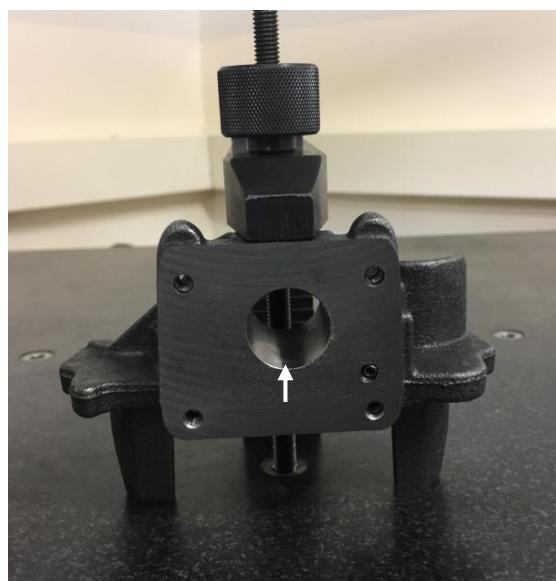


Figura 3.3 - Um bloco fixado na mesa da MMC durante a medição da rugosidade do cilindro.

Para a posição adotada do bloco do compressor, a medição da rugosidade do cilindro foi efetuada a uma distância de aproximadamente 20 mm da base do bloco, conforme mostrado na Fig. 3.4.

Para aquisição e processamento dos dados foi utilizado o programa computacional *Talyprofile Gold* 4.0, fornecido pelo fabricante do Rugosímetro Surtronic 3+ da Taylor Hobson.

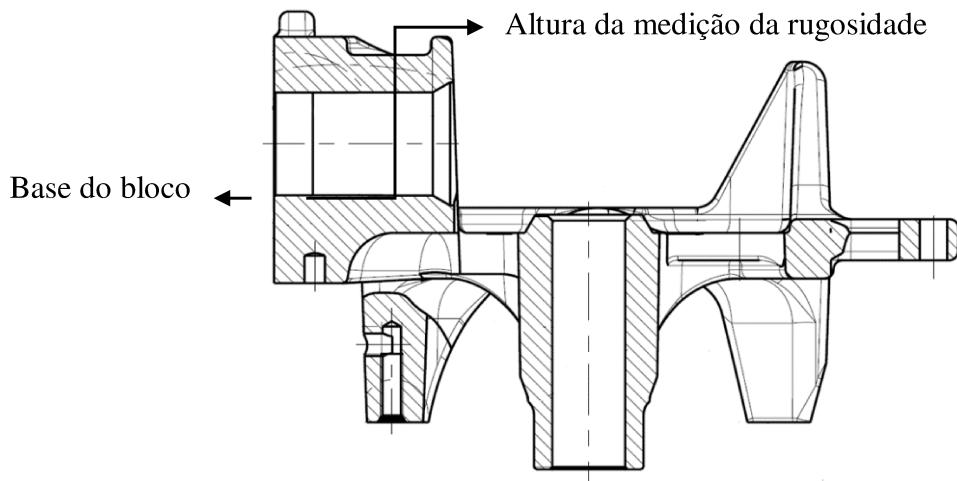


Figura 3.4 - Desenho do bloco do compressor hermético (EMBRACO, 2016) com a indicação da base deste.

3.3.1 Avaliação da incerteza de medição

A avaliação da incerteza de medição tem o objetivo de contribuir para a rastreabilidade do resultado de uma medição, sendo assim foi estimado a incerteza de medição para todos os parâmetros em questão, Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rk , Rpk , Rvk , CV , $Mr1$ e $Mr2$. O método utilizado para essa avaliação foi o método proposto no JCGM 100 (BIPM et al., 2008).

A norma ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) define os parâmetros de amplitude Ra , Rq , Rp , Rv e Rt , que são calculados a partir das equações apresentadas no capítulo anterior. Por outro lado, a norma ISO 13565-2 (ISO, 1996) descreve os parâmetros Rk , Rpk , Rvk , $Mr1$ e $Mr2$, definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone*. As equações utilizadas para o cálculo destes parâmetros foram usadas como ponto inicial para avaliação da incerteza de medição e identificação das variáveis de influência.

Os valores dos parâmetros de amplitude podem ser influenciados por: variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro ($\bar{x}(L_{Rug})$) (LEAL, 2013); resolução do rugosímetro (R_{Rug}); raio da ponta do apalpador (A_R) (BHUSHAN, 2002, CHAND et al., 2011); deformação da amostra durante a medição (D) (POON, BHUSHAN, 1995); afastamento da temperatura com

relação a 20 °C (ΔT); variação da temperatura durante a medição (δT) e a incerteza associada à calibração do rugosímetro (IC_{Rug}). As variáveis de influência citadas acima foram também às mesmas atribuídas aos parâmetros funcionais da família Rk , as fronteiras $Mr1$ e $Mr2$, e a relação Rp/Rt (coeficiente de vazio CV).

A variável amplitude da vibração mecânica (V) não foi considerada durante o cálculo da incerteza, pois a medição da rugosidade foi realizada com o rugosímetro e o bloco sob um desempenho.

Os parâmetros de amplitude são obtidos a partir das ordenadas dos pontos que definem o perfil de rugosidade, enquanto que os parâmetros funcionais são definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone*, que consequentemente é definida a partir das ordenadas. O número de pontos coletados em cada medição depende do comprimento de amostragem, que para este caso foi assumido como sendo 0,8 mm, coletando 8000 pontos. Os pontos são definidos pelas coordenadas X e Z gerando o perfil efetivo de rugosidade, por meio de um gráfico bidimensional. Para encontrar o valor da coordenada X correspondente de cada ponto, basta dividir o comprimento de avaliação pela quantidade total de pontos, enquanto que para determinar o valor da ordenada Z utilizam-se alguns programas computacionais dedicados.

Desta forma as incertezas associadas às coordenadas X e Z de um determinado ponto do perfil de rugosidade são diferentes entre si e diferentes das incertezas associadas às coordenadas de outro ponto e assim por diante. Entretanto neste trabalho a incerteza associada à coordenada Z foi desconsiderada. A justificativa para este fato está dada em primeiro lugar, pela impossibilidade de obtenção destes valores e em segundo lugar e não menos importante, porque se espera que a variabilidade entre estes valores de incerteza seja desprezível para o nível de exatidão requerido durante a medição.

A Equação (3.1) é proposta para o cálculo da incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rk , Rpk , Rvk , $Mr1$ e $Mr2$. Para o CV foi empregada a Eq. (3.2).

$$R = \bar{x}(L_{Rug}) + \Delta R_{Rug} + \Delta IC_{Rug} + \Delta A_R + \Delta D \quad (3.1)$$

$$CV = \bar{x}(L_{CV}) + \frac{\Delta R_p}{\Delta R_t} \quad (3.2)$$

Sendo IC_{Rug} a incerteza associada à calibração do rugosímetro, R_{Rug} o parâmetro de rugosidade medido e CV o coeficiente de vazio. As variáveis de influência são:

- R : incerteza de medição para cada parâmetro;
- $\bar{x}(L_{Rug})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro;
- $\bar{x}(L_{cv})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro CV ;
- ΔR_{Rug} : correção associada à resolução do rugosímetro;
- ΔIC_{Rug} : correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro;
- ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador;
- ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição;
- ΔRp : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rp ;
- ΔRt : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rt .

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas nas Eqs. (3.1) e (3.2), obtém-se as Eqs. (3.3) e (3.4), que permite determinar a incerteza-padrão combinada, conforme o método proposto no JCGM 100 (BIPM et al., 2008).

$$u_c^2(R) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta IC_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta A_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta D) \quad (3.3)$$

$$u_c^2(CV) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{cv})) + \left(\frac{1}{\Delta R_t} \right)^2 \cdot u^2(\Delta R_p) + \left(- \left(\frac{\Delta R_p}{\Delta R_t^2} \right) \right)^2 \cdot u^2(\Delta R_t) \quad (3.4)$$

O tipo de avaliação da incerteza (TA), o tipo de distribuição de probabilidades (DP), a equação para cálculo da incerteza padrão, os graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) adotados para as variáveis de influência na avaliação da incerteza na medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rk , Rpk , Rvk , $Mr1$, $Mr2$, e na medição do coeficiente de vazio CV são apresentados nas Tabs. 3.3 e 3.4.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4, s é o desvio padrão dos valores indicados pelo rugosímetro, n é o número de leituras, R_{Rug} é a resolução do rugosímetro $0,01 \mu\text{m}$, $U(IC_{Rug})$ é incerteza expandida da calibração do rugosímetro $0,02 \mu\text{m}$, k_{Rug} é o fator de abrangência para o rugosímetro 2,23 e probabilidade de abrangência de 95 %, $v_{efetivo(Rp)}$ é o grau de liberdade do parâmetro Rp e $v_{efetivo(Rt)}$ é o grau de liberdade do parâmetro Rt . O valor da deformação experimentada pelo material do bloco do compressor (D) durante a medição, neste trabalho, foi adotado como sendo 5 nm.

Tabela 3.3 - Tipo de avaliação da incerteza (TA), tipo de distribuição de probabilidades (DP), equação da incerteza padrão, graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) adotados para cada variável de influência na avaliação da incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_t , R_{vk} , R_{pk} , R_k , $Mr1$ e $Mr2$.

Grandezas	TA	DP	Incerteza Padrão	GL	CS
$\bar{x}(L_{Rug})$	A	<i>T-Student</i>	$u(\bar{x}(L_{Rug})) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	$n-1$	1
ΔR_{Rug}	B	Retangular	$u(R_{Rug}) = \frac{R_{Rug}}{2 \cdot \sqrt{3}}$	∞	1
ΔIC_{Rug}	B	Normal	$u(IC_{Rug}) = \frac{U(IC_{Rug})}{k_{Rug}}$	10	1
ΔA_R	B	Triangular	$u(A_R) = \frac{0,02 \cdot P}{\sqrt{6}}$	∞	1
ΔD	B	Triangular	$u(D) = \frac{D}{\sqrt{6}}$	∞	1

Tabela 3.4 - Tipo de avaliação da incerteza (TA), tipo de distribuição de probabilidades (DP), equação da incerteza padrão, graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) adotados para cada variável de influência na avaliação da incerteza associada à medição do parâmetro de rugosidade CV .

Grandezas	TA	DP	Incerteza Padrão	GL	CS
$\bar{x}(L_{Rug})$	A	<i>T-Student</i>	$u(\bar{x}(L_{Rug})) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	$n-1$	1
ΔR_p	A	<i>T-Student</i>	$u(\Delta R_p)$	$v_{efetivo(Rp)}$	$\frac{1}{\Delta R_t}$
ΔR_t	A	<i>T-Student</i>	$u(\Delta R_t)$	$v_{efetivo(Rt)}$	$\frac{\Delta R_p}{\Delta R_t^2}$

3.4. Brunimento flexível

A principal operação de usinagem responsável pela pesquisa efetuada neste trabalho refere-se ao brunimento flexível, realizada no Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia, utilizando uma máquina fresadora CNC, modelo Discovery 760 da Romi, Fig. 3.5, cuja potência do motor principal é de 12,5 CV, com rotação máxima de 10 000 rpm. Esta máquina apresenta cursor nos três eixos X, Y e Z iguais a 762 mm, 406 mm e 508 mm, dimensões da mesa de 915 mm de largura e 360 mm de comprimento e, avanços rápidos de 30 m/min para os eixos X e Y e de 20 m/min para o eixo Z.



Figura 3.5 - Centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2016).

A utilização de um centro de usinagem CNC reproduz satisfatoriamente todas as condições de operação, em comparação ao processo de produção fabril que é realizado em uma máquina especial multifuso.

O fluido de corte utilizado durante o brunimento flexível foi uma emulsão sintética com concentração de 95 % e vazão de aproximadamente 1,10 m³/h, disponível na máquina CNC.

Em trabalho recente Pereira (2016) afirmou que os valores de rotação da ferramenta de 700 rpm e velocidade de avanço da ferramenta de 1400 mm/min proporcionaram resultados

melhores para os parâmetros de rugosidade avaliados, considerando a função do cilindro de compressores herméticos. Assim sendo, neste trabalho foram adotados os valores apresentados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 - Especificações das condições do brunimento flexível (PEREIRA, 2016).

Rotação da Ferramenta	700 rpm
Velocidade de Avanço da Ferramenta	1400 mm/min

Para realização do brunimento flexível foram utilizadas duas ferramentas brunidoras flexíveis, com granulometrias diferentes, 400 *mesh* e 800 *mesh*, respectivamente, as quais são mostradas nas Fig. 3.6a e Fig. 3.6b. A especificação de ambas as ferramentas é mostrada na Tab. 3.6. Durante a operação de brunimento, a ferramenta foi fixada na máquina fresadora CNC por meio de um mandril tipo chave de forma a deixar um comprimento em balanço da ferramenta de 22 mm.

Tabela 3.6 - Especificações da ferramenta brunidora flexível (VERTEC, 2016).

Composição	SiC e Ligante Resinóide
Diâmetro Nominal da Ferramenta	24,2 mm

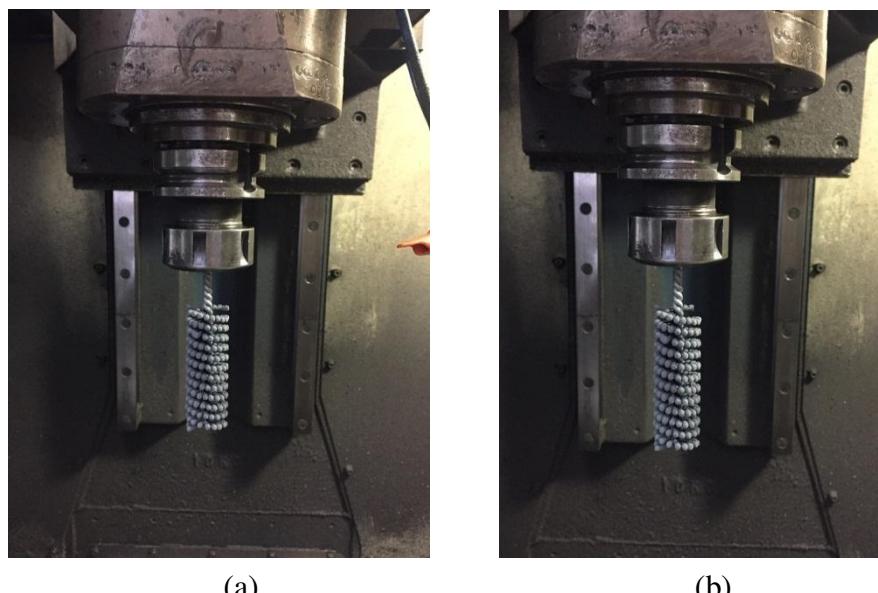


Figura 3.6 - Brunidores flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria (a) 400 *mesh* e (b) 800 *mesh*.

3.4.1. Sistema de fixação e alinhamento do cilindro

Devido à geometria complexa do bloco do compressor recíproco alternativo hermético, Fernandes (2014) projetou e fabricou um dispositivo para fixar o bloco na máquina fresadora CNC. O material utilizado para construção foi o ferro fundido, com dimensões de 55 mm de largura, 40 mm de altura e 90 mm de comprimento. A usinagem foi realizada em um centro de usinagem CNC com operações de fresamento e furação.

O dispositivo possui três furos em sua superfície, um no centro com diâmetro de 40 mm, e dois posicionados em diagonal com diâmetro de 4 mm, Fig. 3.7a. O primeiro tem por objetivo de facilitar e escoar o fluido de corte enquanto os dois últimos foram utilizados para colocar dois pinos para a fixação do bloco, Fig. 3.7b.

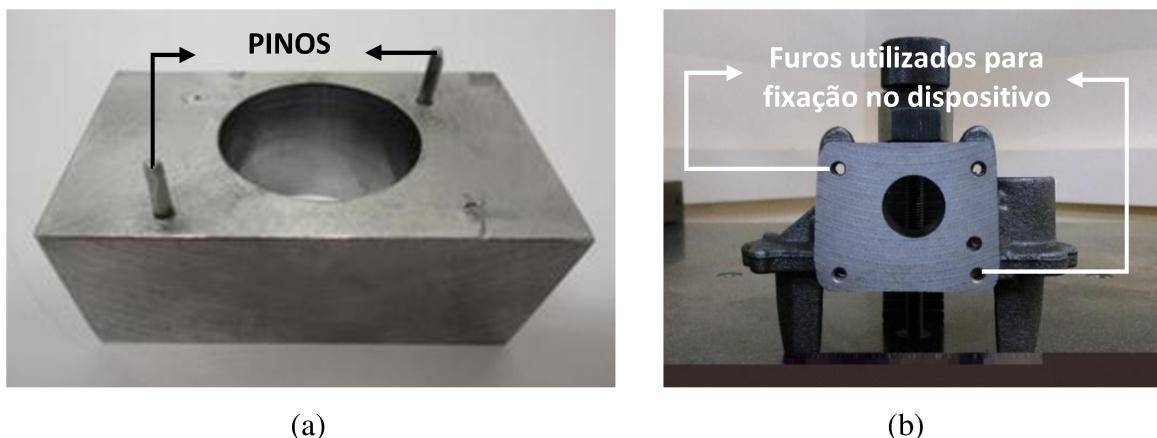


Figura 3.7 - (a) Dispositivo utilizado para fixação do bloco no centro de usinagem CNC durante a realização do brunimento flexível (FERNANDES, 2014) e (b) furos do bloco do compressor utilizados para fixação no dispositivo.

O dispositivo junto com o bloco foi fixado na máquina CNC utilizando duas castanhas, sendo uma fixa, enquanto a outra pode se movimentar através de um sistema de roscas, para segurar e afixar o bloco, conforme a Fig. 3.8.

A ferramenta flexível é autocentrante, portanto o alinhamento do brunidor flexível com o cilindro do bloco do compressor foi realizado identificando e coincidindo visualmente o centro do círculo com a haste da ferramenta.

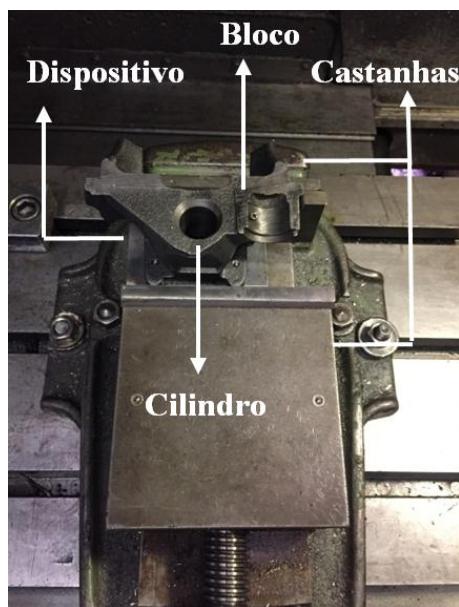


Figura 3.8 - Fixação do dispositivo e bloco na máquina CNC.

Uma foto da operação de brunimento flexível é mostrada na Fig. 3.9. Nota-se o sistema por completo, a abundância de fluídos de corte durante a usinagem do bloco pela ferramenta brunidora. A ferramenta faz um percurso de avanço e recuo de 55 mm, garantindo que o brunimento seja feito em toda a superfície do cilindro.



Figura 3.9 - Sistema de usinagem brunimento flexível.

Após o brunimento flexível foi novamente avaliada a rugosidade dos 30 cilindros. Os resultados obtidos foram então comparados com aqueles encontrados após o brunimento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e discutidos os resultados decorrentes dos experimentos realizados. Os mesmos foram divididos em sete etapas em função dos parâmetros de rugosidade avaliados. Vale ressaltar que os parâmetros da família Rk foram apresentados em um item devido à necessidade de discutir os mesmos de forma conjunta. Em todos os casos é declarada a incerteza expandida associada à medição.

4.1. Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade do cilindro (Ra)

A Figura 4.1 mostra os valores médios de Ra dos cilindros usinados pelo brunimento convencional (BC) e brunimento convencional acrescido do brunimento flexível (BC+BF) nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). O valor de incerteza apresentado para cada experimento corresponde ao maior valor de incerteza expandida obtido entre os cinco blocos usinados em cada condição. No APÊNDICE I são exibidos o valor médio de Ra , o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o BF.

Nota-se a partir da Fig. 4.1 que os valores de Ra são significativamente menores após o brunimento flexível em todas as condições investigadas. O Experimento 2 (com um golpe da ferramenta e granulometria da ferramenta de 800 mesh) foi o que resultou na menor diferença percentual da rugosidade Ra entre os processos de BC e BC+BF, sendo em média de 28,7 % (0,065 μm). O Experimento 6 mostrou a maior evolução dos valores médios de Ra , com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 mesh e 5 golpes da ferramenta

brunidora flexível como mostra a Fig. 4.2. Nesta condição foi observada a maior diferença percentual entre os valores médios de R_a dos cilindros obtidos pelos dois processos, em média de 52,1 % ($0,112 \mu\text{m}$). Embora os efeitos produzidos nos valores médios de R_a sejam significativos, pouco deverão alterar os valores de diâmetro do cilindro. Isso pode ser justificado porque a rugosidade é um desvio microgeométrico cuja grandeza é significativamente menor que a tolerância dimensional.

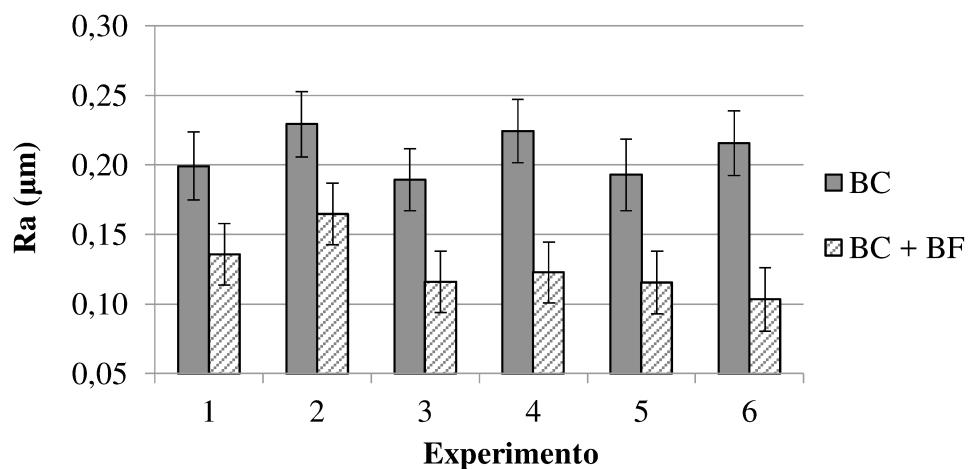


Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro R_a para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

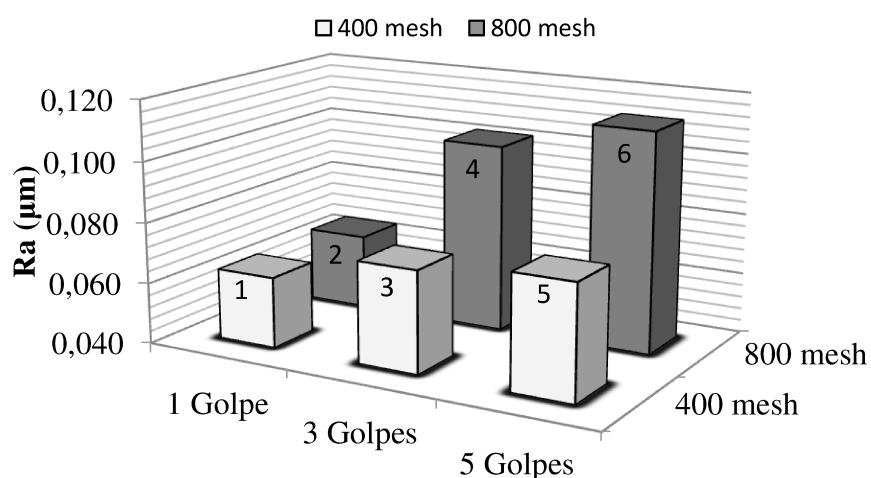


Figura 4.2 - Diferença entre os valores médios de R_a obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro Ra , nota-se que os valores não alteraram com o processo de brunitamento flexível. Os valores da incerteza expandida para o BC e BC+BF nos 30 blocos assumiram o valor de 0,03 μm para todos os blocos. Isso pode ser justificado pelo fato do Ra representar uma rugosidade média, exibindo valores de desvio padrão amostral pouco expressivos para todas as condições investigadas. Vale ressaltar que o brunitamento flexível tem como uma das principais características a remoção de pequenos microcavacos e, portanto afeta pouco os valores de Ra .

A Tabela 4.1 apresenta os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95 %) para o parâmetro de rugosidade Ra do cilindro 6, do Experimento 4, usinado pelo brunitamento flexível. Para todos os demais cilindros os resultados foram similares e, portanto não são aqui apresentados.

Na Tabela 4.1 foram acrescentados três algarismos a todos os resultados de cálculos intermediários para diminuir os erros devidos ao arredondamento. Nesta tabela, TA é o tipo de avaliação da incerteza, DP o tipo de distribuição de probabilidade, GL os graus de liberdade e CS o coeficiente de sensibilidade.

Tabela 4.1 - Dados referentes à avaliação da incerteza do parâmetro Ra para o cilindro 6 e Experimento 4 usinado pelo BC+BF.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
\bar{x}	0,10000	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,00389
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_{Rug}	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,002	B	Triangular	∞	1	0,00082
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,01043
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						16,79
Fator de abrangência (k)						2,11
Incerteza expandida (U) em μm						0,022

Para o cilindro em questão a incerteza-padrão associada à calibração do rugosímetro foi a variável que mais contribuiu para a incerteza final representando 74,0 % da incerteza-padrão combinada. A segunda variável em contribuição foi a variabilidade das leituras com 13,9 %.

Por sua vez, a contribuição da resolução do rugosímetro foi de 7,7 %, seguida do raio da ponta do apalpador com 0,6 %.

A incerteza expandida para o parâmetro Ra do cilindro 6 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,03 μm , para um fator de abrangência k igual a 2,11, e probabilidade de abrangência de 95 %. Resultados similares foram encontrados para todos os cilindros em todas as condições investigadas.

A Tabela 4.2 mostra o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro Ra obtidos antes e após o brunimento flexível. Nesta tabela pode ser observado que os fatores granulometria da ferramenta brunidora (GR), número de golpes da ferramenta brunidora (NG) e a interação entre os dois fatores (GR x NG) introduziram efeitos estatisticamente significativos nos valores da variável resposta Ra para uma confiabilidade de 95 %. Dentre eles, o que provocou o maior efeito foi a granulometria (GR), seguido da interação entre os fatores (GR x NG) e o número de golpes (NG).

Tabela 4.2 - ANOVA da diferença do parâmetro Ra de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Ra	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,003454	1	0,003454	12,1604	0,001902
Nº de golpes (NG)	0,002374	2	0,001187	4,1791	0,027716
GR x NG	0,004427	2	0,002214	7,7938	0,002465
Erro	0,006817	24	0,000284		

A diminuição das dimensões das partículas abrasivas da ferramenta brunidora flexível reduziu o parâmetro de rugosidade Ra , conforme observado na Fig. 4.2. Isso se deve ao fato de que menores partículas abrasivas tendem a produzir sulcos ou marcas menores e consequentemente um melhor acabamento superficial. Na mesma figura percebe-se que o aumento no número de golpes da ferramenta reduziu a rugosidade Ra . Isso pode ser justificado pelo maior tempo de contato das partículas abrasivas da ferramenta brunidora flexível com a superfície do cilindro, ocasionando maior remoção de microcavacos, e com isso, promovendo a quebra dos picos com maior eficiência.

Ressaltando que para superfícies brunidas o parâmetro Ra não deve ser avaliado isoladamente, pois não diferencia picos de vales e pode ocultar a presença destes quando aparecem de forma isolada no perfil de rugosidade.

A Figura 4.3 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença do parâmetro Ra de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível, e apresenta a tendência dos resíduos à distribuição próxima da probabilidade normal para o parâmetro avaliado.

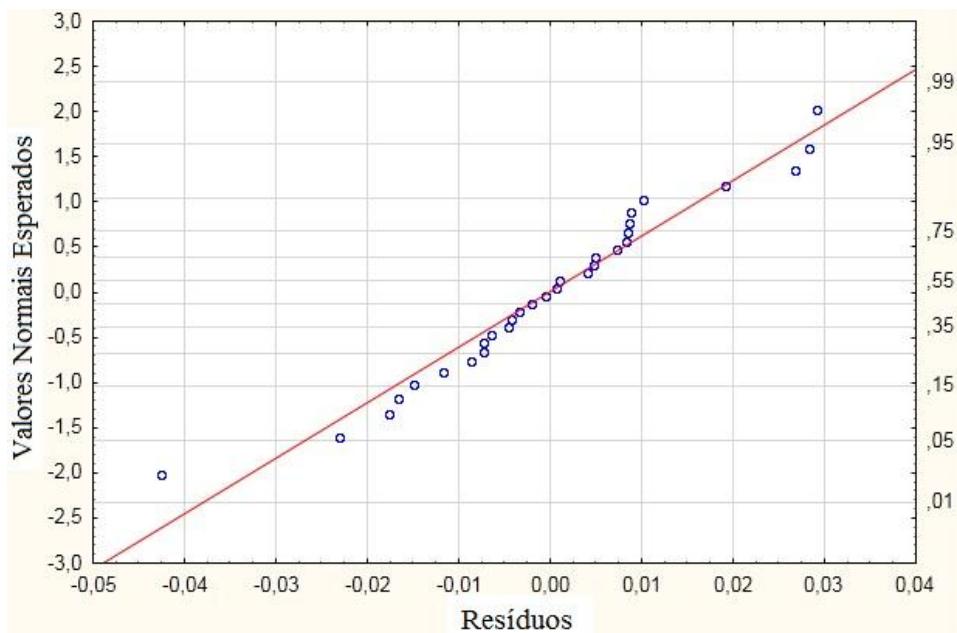


Figura 4.3 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Ra de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

4.2. Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade do cilindro (Rq)

São mostrados na Fig. 4.5 os valores médios do parâmetro Rq dos cilindros usinados pelas operações de BC e BC+BF nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). São exibidos no APÊNDICE II o valor médio de Rq , o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível.

A partir da Fig. 4.4, se conclui que os valores de Rq são significativamente menores após o brunimento flexível em todas as 6 das condições investigadas. Resultado este similar ao observado para o parâmetro Ra .

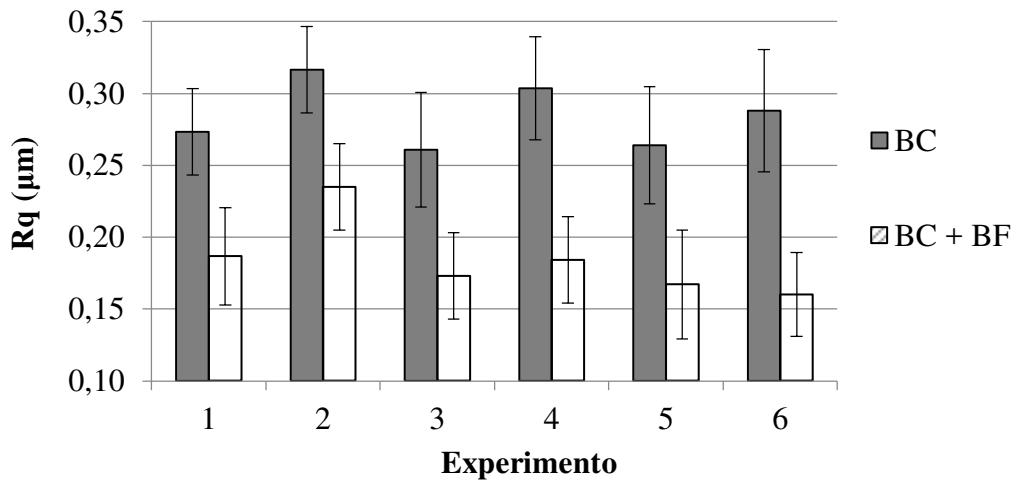


Figura 4.4 - Valores médios do parâmetro Rq para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro Rq , nota-se que estes não se alteraram após o BC+BF, indicando que a repetibilidade dos valores de rugosidade obtidos antes e após o BF é similar. Uma distinção pode ser feita para os Experimentos 3 e 6 (com três golpes da ferramenta e granulometria de 400 *mesh* e cinco golpes da ferramenta e granulometria de 800 *mesh*, respectivamente) para os quais houve uma maior redução da incerteza expandida, sendo em porcentagem de 25,0 % e 31,5 % respectivamente.

O Experimento 2 foi aquele que apresentou a menor diferença percentual da rugosidade Rq entre os cilindros usinados pelo processos de BC e BC+BF, sendo em média de 25,7 %. O Experimento 6 mostrou a maior evolução dos valores médios de Rq (granulometria de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta) como mostra a Fig. 4.5. Nesta condição a diferença percentual observada entre os valores médios de Rq antes e após a aplicação do BF foi em média de 44,4 %.

A Figura 4.5 mostra que a diferença entre os valores médios de Rq antes e após o brunimento flexível se apresenta de maneira similar ao parâmetro Ra . Percebe-se que para a ferramenta brunidora de 800 *mesh* se obtiveram maiores reduções quando comparada com a ferramenta com granulometria de 400 *mesh*, e que a redução aumentou com o aumento do número de golpes, mantendo constante a granulometria.

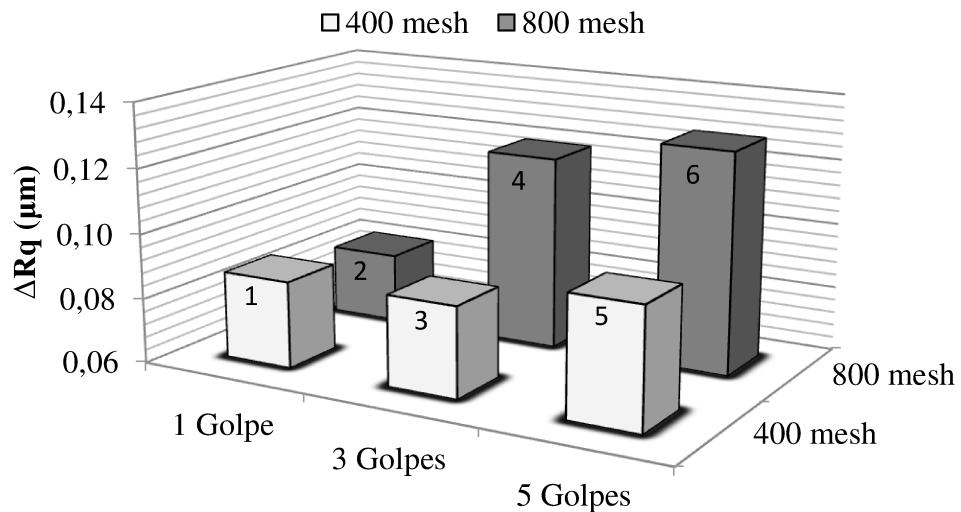


Figura 4.5 - Diferença entre os valores médios de Rq obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

É mostrado na Tab. 4.3 o resultado da ANOVA para as diferenças entre os valores do parâmetro Rq após o BC e o BC+BF. Nesta tabela pode ser observado que para uma confiabilidade de 95% o fator granulometria da ferramenta (GR) e a interação entre os dois fatores (GR x NG) produziram efeitos estatisticamente significativos na variável resposta Rq .

Tabela 4.3 - ANOVA da diferença do parâmetro Rq de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rq	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,002725	1	0,002725	4,3082	0,048812
Nº de golpes (NG)	0,001891	2	0,000946	1,4952	0,244364
GR x NG	0,004561	2	0,002281	3,6061	0,042723
Erro	0,015178	24	0,000632		

Como analisado para o parâmetro Ra , os cilindros que receberam o processo de brunimento não devem ser caracterizados pelo parâmetro Rq isoladamente, uma vez que por ser uma rugosidade média não caracteriza de forma adequada este tipo de superfície, apesar de evidenciar os picos e vales isolados por elevar as ordenadas dos pontos do perfil ao quadrado.

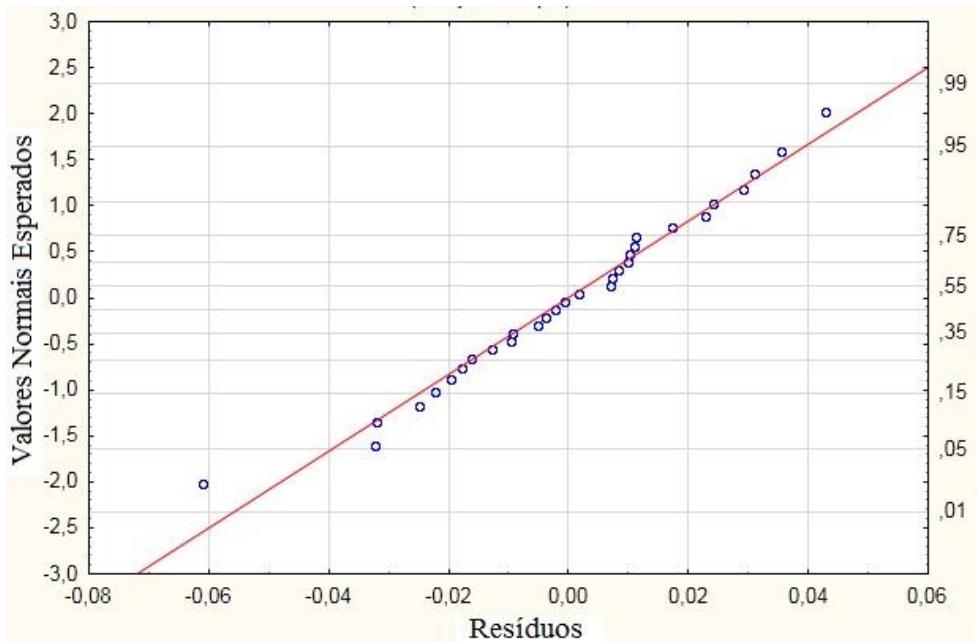


Figura 4.6 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rq de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença do parâmetro Rq (Fig. 4.6) mostra que os resíduos têm distribuição próxima da normal.

A partir da análise dos valores de Ra e Rq pode-se concluir estes parâmetros foram reduzidos após a aplicação do BF, evidenciando uma melhora no acabamento superficial dos cilindros.

4.3. Altura máxima do pico do perfil (Rp)

Na Figura 4.7 são apresentados os valores médios de Rp dos cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). O valor médio de Rp , o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível são mostrados no APÊNDICE III.

Percebe-se a partir da Fig. 4.7 que os valores do parâmetro de rugosidade Rp são significativamente menores após o brunimento flexível em todas as condições investigadas, bem como os valores de incerteza expandida associados. Considerando que o BF é aplicado

para reduzir a altura dos picos, este resultado era esperado, uma vez que o R_p é determinado como sendo a maior ordenada de pico no comprimento de amostragem. Os perfis de rugosidade mostrados na Figura 4.8 evidenciam este fato.

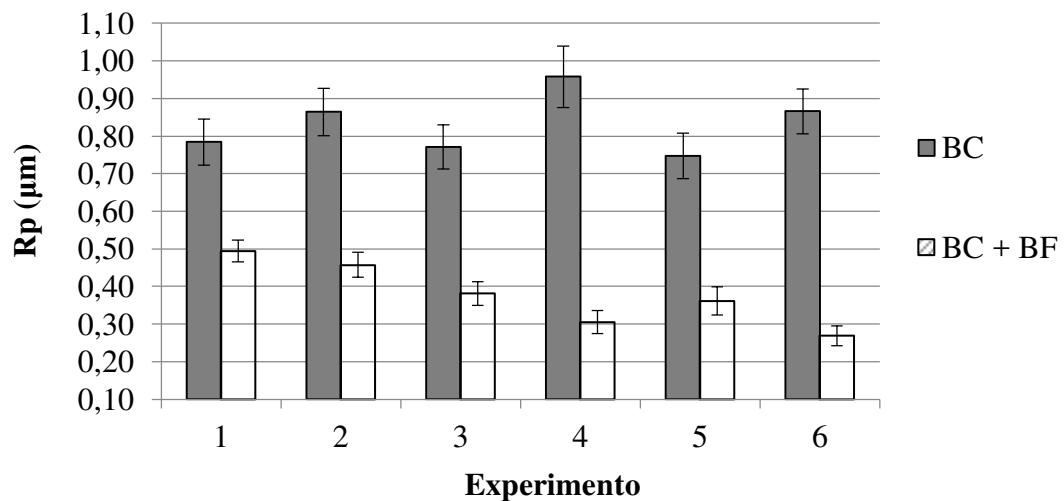


Figura 4.7 - Valores médios do parâmetro R_p para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

Na Figura 4.8 são apresentados o perfis efetivos referentes ao cilindro do bloco 26 usinado pelo BC (Fig. 4.8a) e BC+BF (Fig. 4.8b) para o Experimento 1, com as condições avaliadas de granulometria da ferramenta de 400 *mesh* e 1 golpe da ferramenta. Observa-se que a Fig. 4.8a, a presença de picos e vales estreitos e isolados no perfil de rugosidade com valores de altura e profundidade máximos de aproximadamente 1,08 μm e 0,92 μm , respectivamente. Comparando este perfil com o mostrado na Fig. 4.8b, usinado com o processo de BC+BF nas condições citadas acima, verifica-se que os picos isolados foram removidos e a altura média de pico foi reduzida, apresentando o valor de altura de aproximadamente 0,44 μm . Já os vales permaneceram com valores de profundidade praticamente inalterados, aproximadamente 0,96 μm .

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro R_p , nota-se que a faixa de valores diminuiu com a aplicação do BC+BF. Vale ressaltar que em particular para este parâmetro de rugosidade a redução dos valores de incerteza expandida foi significativa, indicando maior repetibilidade dos valores de rugosidade encontrados. Isso pode ser

justificado pelo fato de que com o processo do brunimento flexível os valores das ordenadas dos picos do perfil ficaram mais homogêneos em decorrência da eliminação de picos isolados e da redução da altura dos picos.

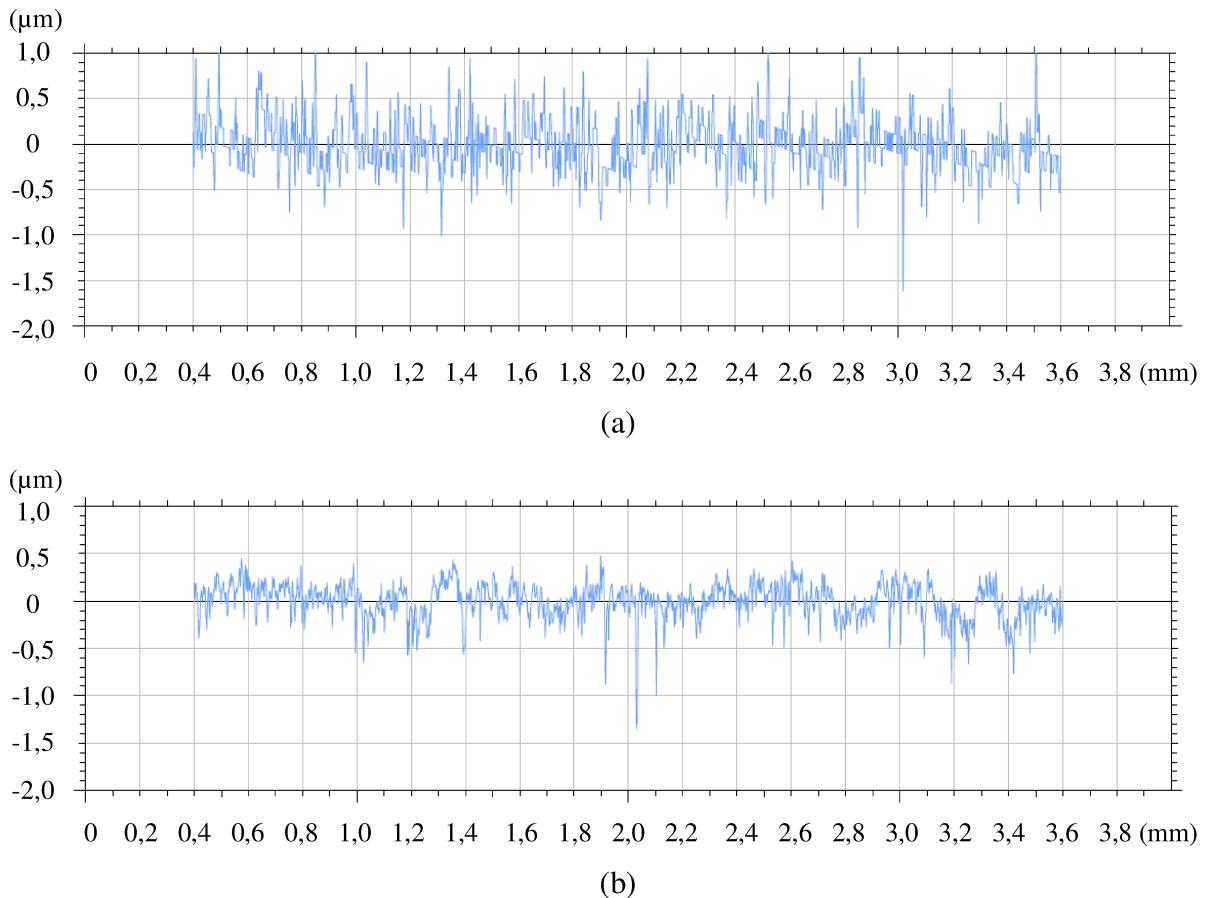


Figura 4.8 - Perfis efetivos referentes ao cilindro do bloco 26 (a) usinado pelo BC e (b) usinado pelo BC+BF.

A diferença entre os valores médios de R_p obtidos entre os processos de BC e BC+BF para cada experimento são apresentados na Fig. 4.9. O Experimento 1 foi o que resultou na menor diferença percentual da rugosidade R_p entre os processos de BC e o BC+BF, sendo em média de 37,0 % (0,290 μm). Para este parâmetro foi observado que também Experimento 6 mostrou a maior evolução dos valores médios de R_p , com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta brunidora flexível, em média de 68,9 % (0,597 μm). O Experimento 4 também mostrou uma evolução significativa, com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 3 golpes da

ferramenta brunidora flexível, sua diferença percentual entre os valores médios de R_p entre os dois processos foi de 68,1 % (0,653 μm).

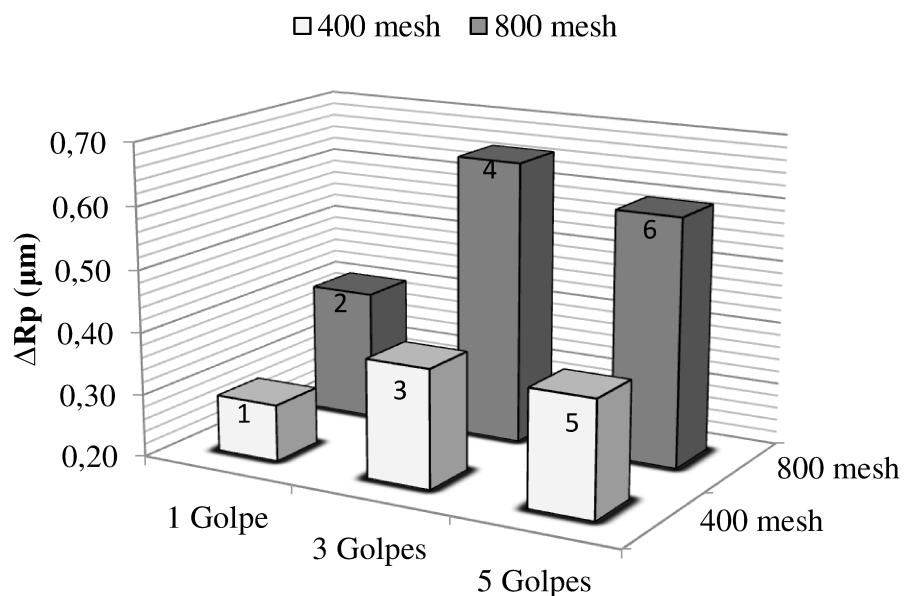


Figura 4.9 - Diferença entre os valores médios de R_p obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

A Tabela 4.4 exibe o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro R_p obtidos antes e após o brunimento flexível. Nesta tabela pode ser observado que o fator granulometria da ferramenta brunidora (GR) e a interação entre os dois fatores (GR x NG) produziram efeitos estatisticamente significativos na variável resposta R_p para uma confiabilidade estatística de 95 %. Dentre eles, o fator de maior contribuição foi a granulometria da ferramenta (GR).

A diminuição das dimensões dos grãos abrasivos da ferramenta brunidora flexível reduziu o parâmetro de rugosidade R_p , conforme observado na Fig. 4.9. Isso pode ser justificado devido a que menores partículas abrasivas tendem a deixar menores marcas e produzirem um acabamento superficial melhor, e consequentemente menores alturas.

Tabela 4.4 - ANOVA da diferença do parâmetro R_p de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

R_p	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,311223	1	0,311223	19,9587	0,000161
Nº de golpes (NG)	0,040459	2	0,020229	1,2973	0,291748
GR x NG	0,127508	2	0,063754	4,0885	0,029647
Erro	0,374240	24	0,015593		

Para os cilindros de compressores herméticos é desejável que o parâmetro R_p seja o menor possível, uma vez que os picos isolados presentes na superfície podem ser desgastados ou quebrados no início do funcionamento do compressor. As partículas desgastadas são misturadas com o fluido lubrificante, tornando-o abrasivo, o que pode diminuir a vida útil do compressor. Esses picos podem levar à existência de contato metal-metal no par tribológico cilindro-pistão, gerando aquecimento e pior desempenho. Ainda, a redução dos picos atribui ao compressor uma condição de amaciamento aumentando sua eficiência.

A Figura 4.10 apresenta os perfis efetivos obtidos na primeira medição dos cilindros usinados com as ferramentas de granulometria de 400 *mesh* referentes aos blocos 26 e 18 para 1 e 3 golpes, respectivamente, seguidos dos perfis efetivos dos cilindros usinados com as ferramentas de granulometria 800 *mesh* referentes aos blocos 4, 10 e 14, para 1, 3 e 5 golpes, respectivamente. À direita são mostrados os valores médios de cada parâmetro considerando as cinco medições efetuadas nos blocos citados. Percebe-se que o Experimento 6 (granulometria 800 *mesh* e 5 golpes) possibilitou a obtenção de um perfil muito similar ao obtido por meio do brunimento platô o que pode aumentar o campo de aplicação do BF. Observa-se, ainda que os valores dos parâmetros obtidos com a ferramenta de granulometria 800 *mesh* e 1 golpe são similares aos obtidos com ferramenta de granulometria 400 *mesh* e 3 golpes. Com isso poderá ser melhorado o acabamento superficial dos cilindros sem a necessidade de aumentar o tempo dedicado a essa operação atualmente na linha de produção da EMBRACO.

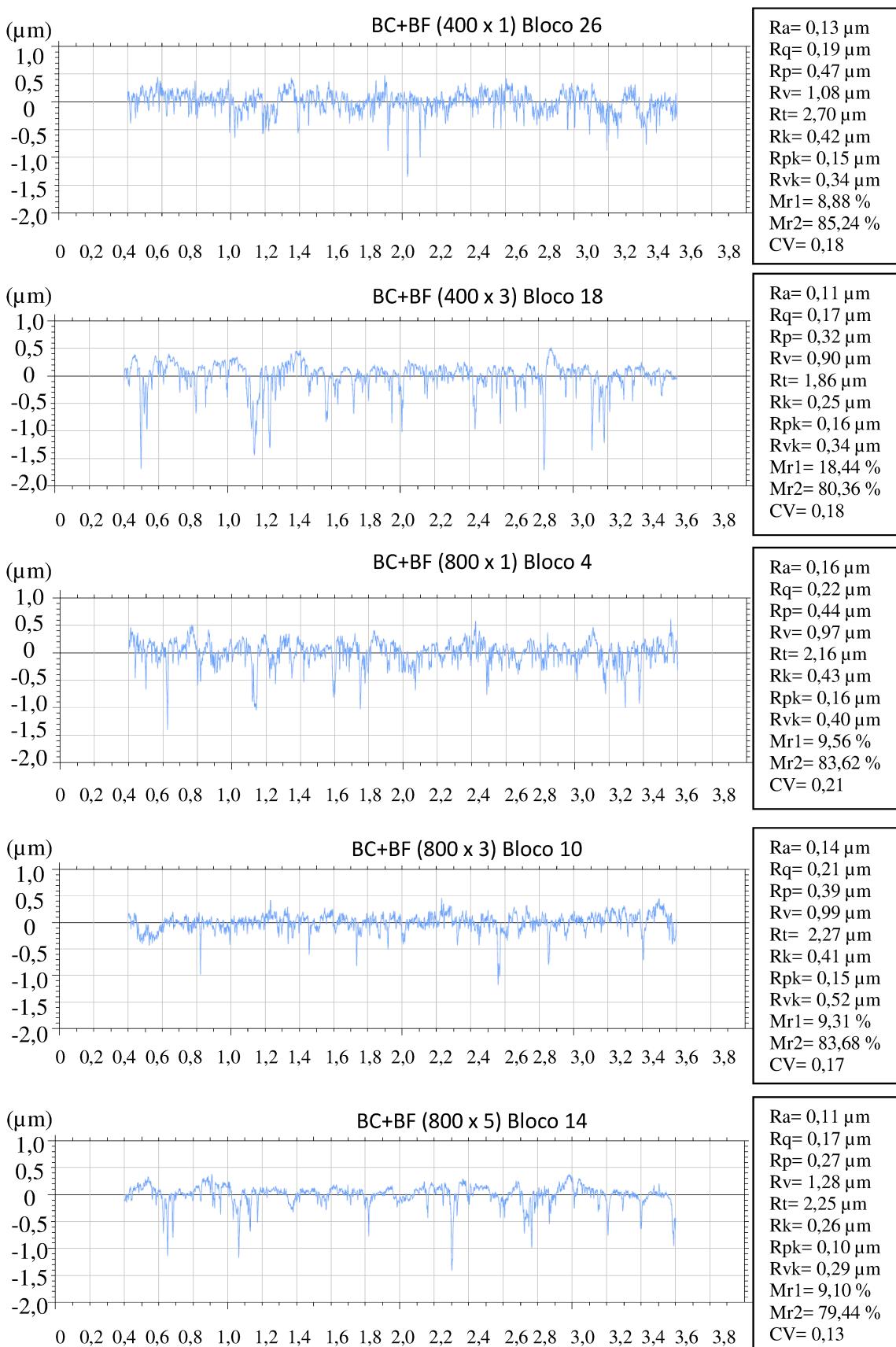


Figura 4.10 - Perfis efetivos referentes aos cilindros usinados pelo BC+BF em diferentes condições e os valores médios de cinco medições obtidos para cada bloco.

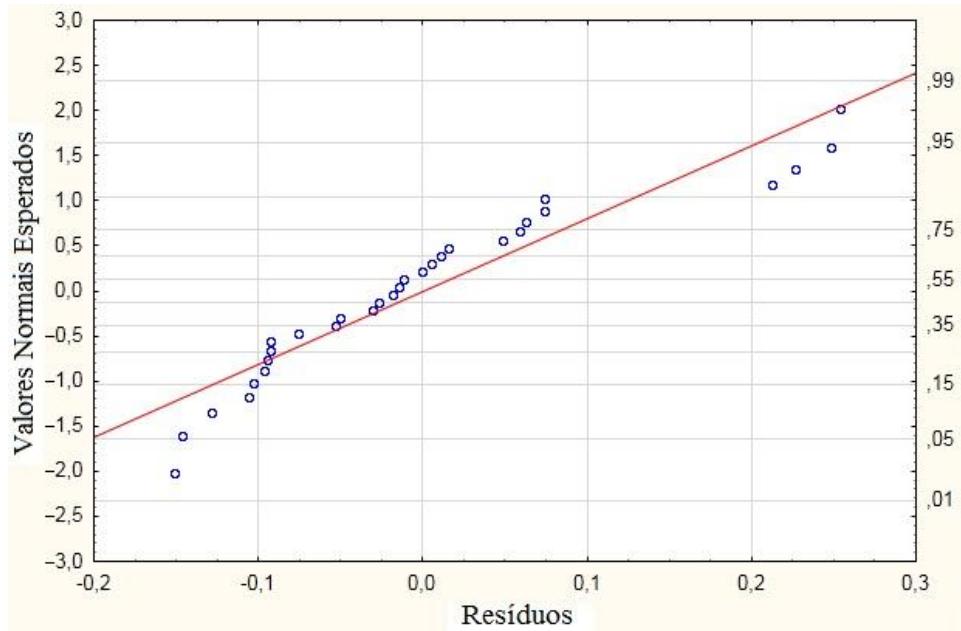


Figura 4.11 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rp de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

A Figura 4.11 nota-se que a distribuição dos resíduos para a diferença do parâmetro Rp acompanha a tendência da probabilidade normal.

4.4. Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade (Rv)

São apresentados na Fig. 4.5 os valores médios de Rv dos cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). No APÊNDICE IV são exibidos o valor médio de Rv , o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível. Nota-se a partir da Fig. 4.12 que os valores médios de Rv apresentaram uma tendência de redução após o BC+BF, bem como os valores de incerteza expandida associados. Entretanto, os resultados obtidos após o BC e aqueles encontrados após o BC+BF podem ser considerados similares, pois as barras de erros que representam a incerteza expandida (95 %) encontram-se sobrepostas.

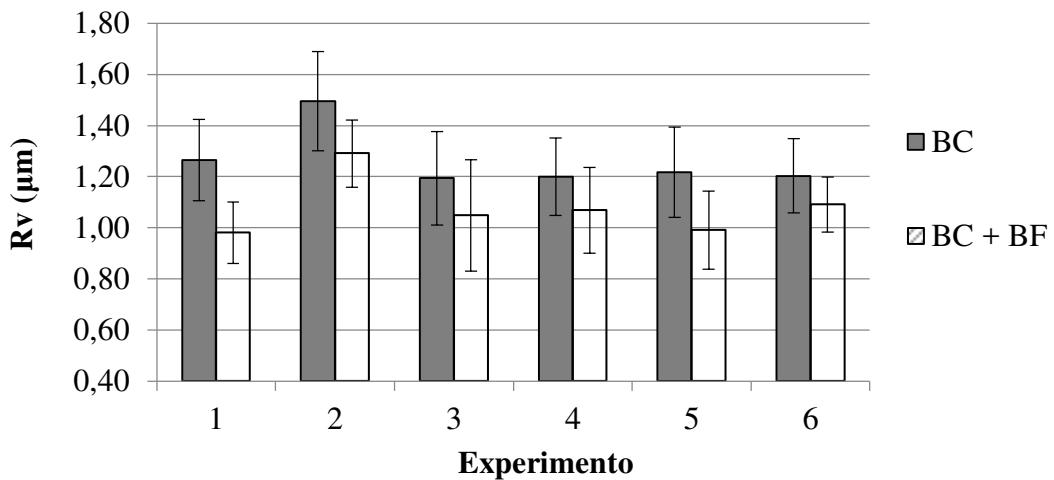


Figura 4.12 - Valores médios do parâmetro Rv para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

Os valores médios encontrados para o parâmetro Rv são poucos significativos, uma vez que este parâmetro representa a maior profundidade de vale no comprimento de amostragem, e o processo de brunimento flexível praticamente não altera o valor dos vales do perfil. As pequenas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que a medição é efetuada em locais diferentes. Ainda, a redução dos valores das ordenadas dos picos com a aplicação do processo de brunimento flexível provoca um deslocamento leve da linha média do perfil de rugosidade na vertical no sentido dos vales.

O Experimento 6 apresentou a menor diferença percentual da rugosidade Rv entre os processos antes e após o brunimento flexível, sendo em média de 9,5 % (0,114 μm), para granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta. O Experimento 1 foi o que resultou a maior diferença entre os valores médios de Rv , com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 400 *mesh* e 1 golpe da ferramenta brunidora flexível como mostra a Fig. 4.13. Nesta condição foi observada a maior diferença percentual entre os valores médios de Rv dos dois processos, em média de 22,4 % (0,284 μm).

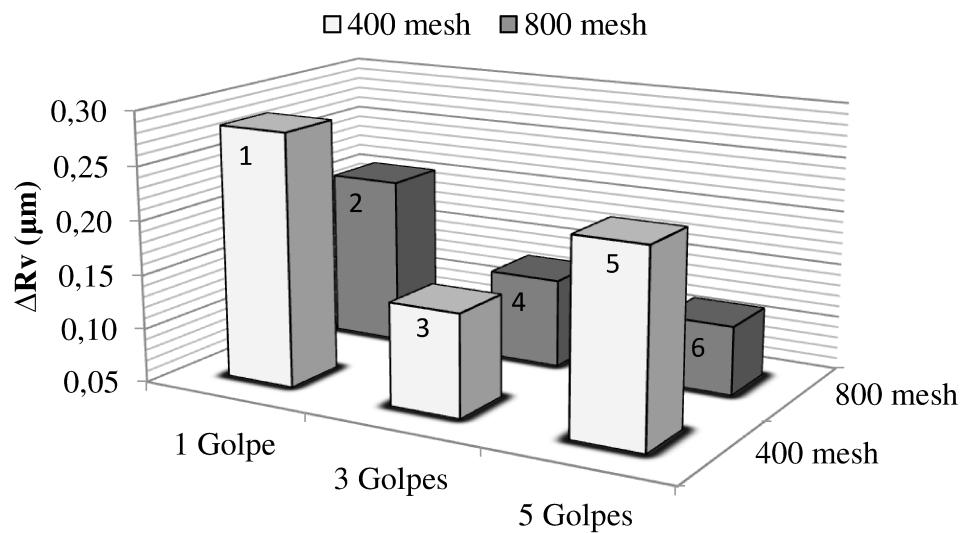


Figura 4.10 - Diferença entre os valores médios de Rv obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

A Figura 4.13 mostra que a diferença entre os valores médios antes e após o brunimento flexível não possui tendência definida para o parâmetro Rv , tanto variando a granulometria quanto o número de golpes da ferramenta brunidora flexível.

Na Tabela 4.5 é apresentado o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro Rv obtidos antes e após o brunimento flexível. Nesta tabela pode ser observado que nenhum dos fatores investigados provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores da variável resposta Rv .

Tabela 4.5 - ANOVA da diferença do parâmetro Rv de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rv	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,034138	1	0,034138	0,56164	0,460882
Nº de golpes (NG)	0,071382	2	0,035691	0,58719	0,563677
GR x NG	0,061105	2	0,030552	0,50265	0,611153
Erro	1,458782	24	0,060783		

Os resultados observados para o parâmetro Rv são particularmente importantes, pois para os cilindros de compressores herméticos usinados pelo brunimento convencional é desejável que o parâmetro Rv após o brunimento flexível se mantenha inalterado. Vale

ressaltar que os vales servem de reservatórios e canais para a circulação de fluído para lubrificar e resfriar o par tribológico cilindro-pistão.

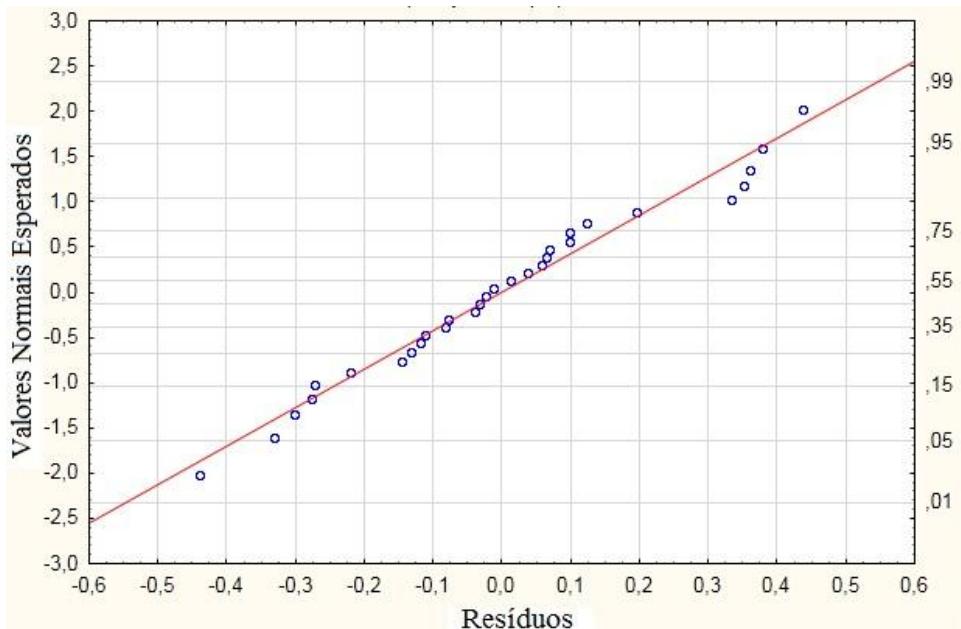


Figura 4.14 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rv de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Nota-se, por meio da Fig. 4.14 que os resíduos têm distribuição próxima da probabilidade normal para o parâmetro avaliado em que mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença do parâmetro Rv de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível

4.5. Altura total do perfil de rugosidade (Rt)

São apresentados na Fig. 4.15 os valores médios de Rt dos cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). São exibidos o valor médio de Rt , o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível no APÊNDICE V.

A partir da Fig. 4.15 tem-se que os valores médios do parâmetro de rugosidade Rt são ligeiramente menores após o brunimento flexível em todas as condições investigadas, sendo

reduzido de forma significativa nos Experimentos 4, 5 e 6 (três golpes da ferramenta e granulometria 800 *mesh* e com cinco golpes da ferramenta e granulometrias de 400 e 800 *mesh*, respectivamente), entretanto, os Experimentos 1, 2 e 3 tiveram sobreposição das barras de erros que representam a incerteza expandida e mostram que os valores atribuídos a estas condições para o parâmetro *Rt* antes e após o BF são similares.

Não foi observada nenhuma tendência para os valores de incerteza expandida. Isso pode ser explicado devido ao fato do parâmetro *Rt* ser fortemente influenciado pela presença de picos e vales isolados, uma vez que é calculado como a soma das ordenadas do pico mais alto e do vale mais profundo no comprimento de avaliação. Assim, se avaliado isoladamente, este parâmetro pode induzir a elaboração de conclusões enganosas.

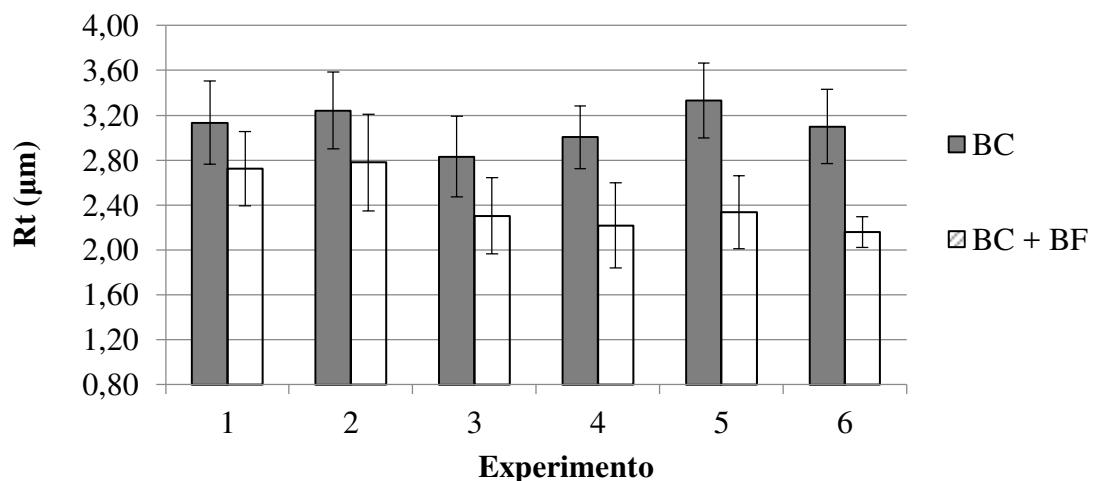


Figura 4.15 - Valores médios do parâmetro *Rt* para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

A diferença entre os valores médios de *Rt* obtidos entre os processos de BC e BC+BF para cada experimento são apresentados na Fig. 4.16. O Experimento 1 foi o que resultou na menor diferença percentual da rugosidade *Rt* entre os processos de BC e BC+BF, sendo em média de 13,2 % (0,412 μm). O Experimento 6 mostrou a maior diferença dos valores médios de *Rt*, com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta brunidora flexível, sendo, em média de 30,3 % (0,940 μm).

Percebe-se na Fig. 4.16 uma tendência de aumento da diferença entre as médias antes e após o brunimento flexível aumentando o número de golpes e diminuindo a granulometria da ferramenta.

A Tabela 4.6 exibe o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro Rt obtidos antes e após o brunimento flexível. Nesta tabela pode ser observado que nenhum dos fatores investigados provocou efeitos estatisticamente significativos na variável resposta Rt para uma confiabilidade de 95 %.

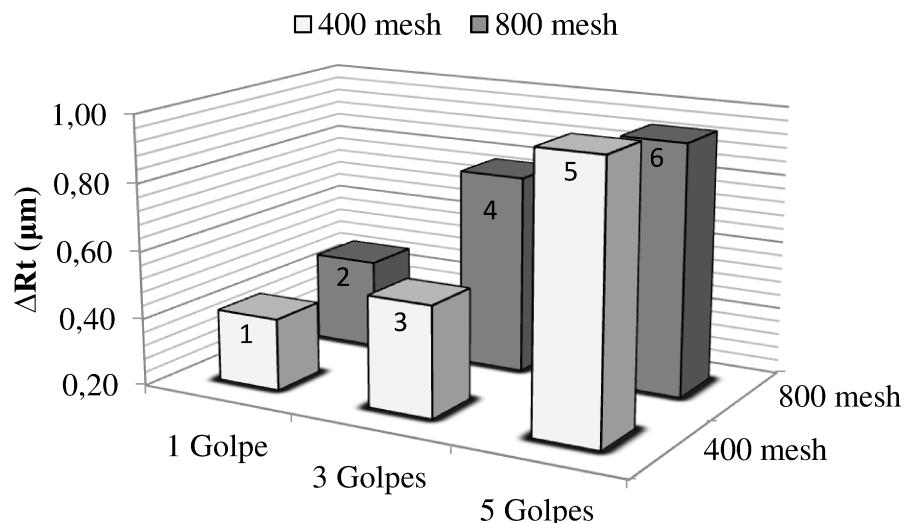


Figura 4.16 - Diferença entre os valores médios de Rt obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

Tabela 4.6 - ANOVA da diferença do parâmetro Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rt	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,13015	1	0,13015	0,56778	0,458471
Nº de golpes (NG)	0,25351	2	0,12675	0,55295	0,582406
GR x NG	0,95559	2	0,47779	2,08434	0,146331
Erro	5,50152	24	0,22923		

Juntamente com as análises feitas anteriormente para outros parâmetros, pode-se concluir que a redução dos valores do parâmetro Rt se deve pela remoção dos picos isolados

da superfície do cilindro após o BC+BF. Entretanto, este parâmetro de rugosidade é fortemente influenciado pela presença e vales isolados, justificando a baixa repetibilidade associada.

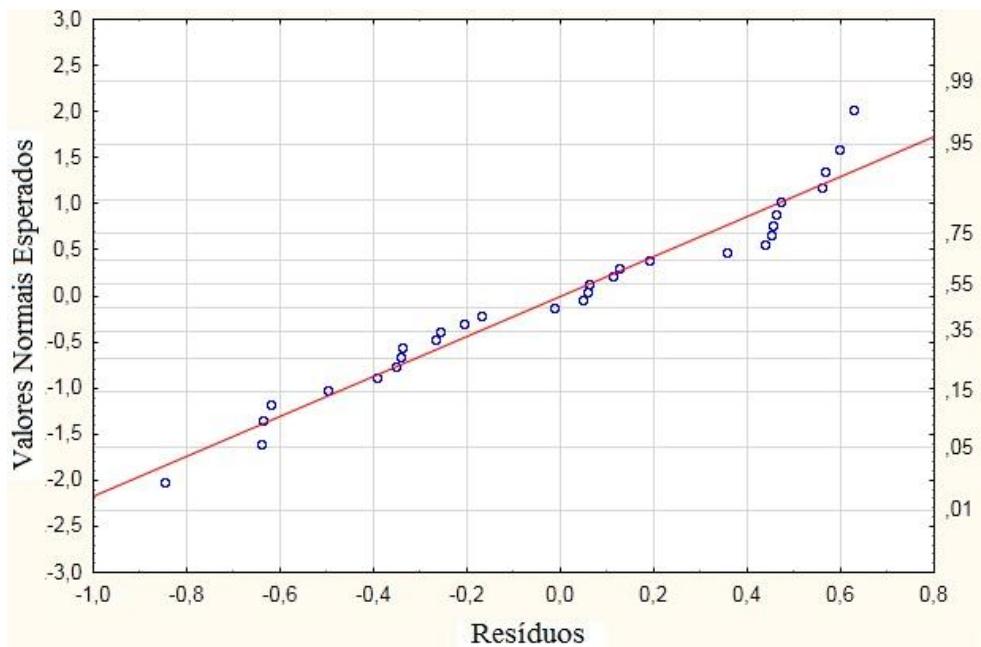


Figura 4.17 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

A Figura 4.17 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença do parâmetro Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível, verifica-se a tendência dos resíduos à distribuição da probabilidade normal para o parâmetro avaliado.

4.6. Família Rk

A Figura 4.18 apresenta os valores médios dos parâmetros de Rpk , Rk e Rvk dos cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 (seis) condições investigadas. Por sua vez a Fig. 4.19 mostra os valores de $Mr1$ e $Mr2$. Nestas figuras a incerteza expandida (95 %) é apresentada como sendo a barra de erros. Nos APÊNDICES VI ao X são exibidos o valor médio, o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível destes cinco parâmetros, respectivamente.

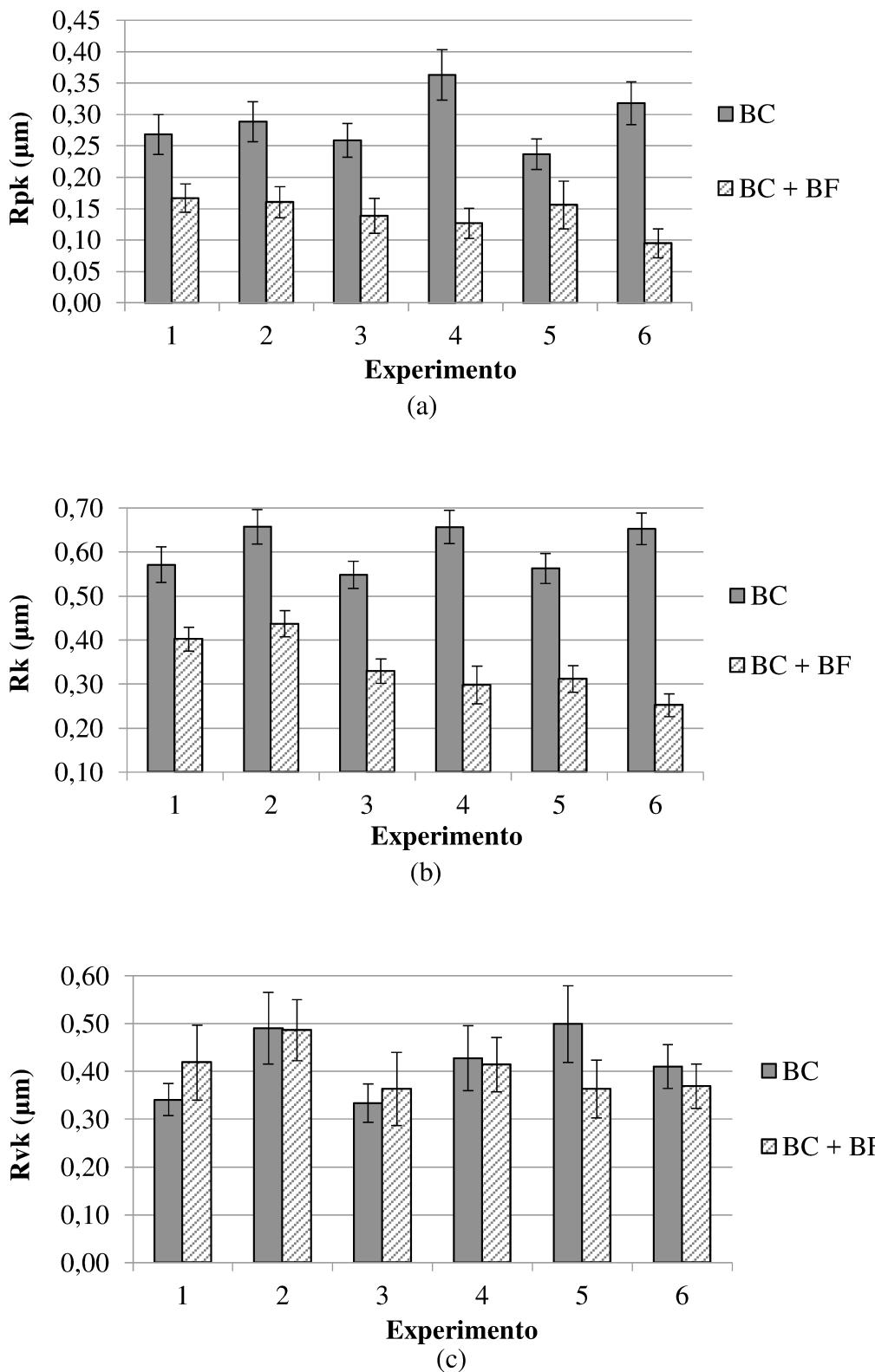


Figura 4.18 - Valores médios para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %) dos parâmetros (a) R_{pk} , (b) R_k e (c) R_{vk} .

Observa-se a partir da Fig. 4.18 que os valores médios dos parâmetros Rk e Rpk foram reduzidos de forma significativa após o brunimento flexível em todas as condições investigadas. Em nenhum dos casos as barras de erros que representam a incerteza expandida encontram-se superpostas. O Experimento 6 (5 golpes da ferramenta e granulometria 800 mesh) forneceu os menores valores de Rk ($0,25 \mu\text{m}$) e de Rpk ($0,09 \mu\text{m}$) após o BC+BF, preservando a profundidade dos vales ($0,37 \mu\text{m}$).

Os valores de Rvk (Fig. 4.18c) não apresentaram uma tendência definida após o BC+BF, aumentaram para os Experimentos 1 e 3 e diminuíram para os demais experimentos. As diferenças observadas entre os valores de Rvk para os cilindros usinados pelos processos BC e BC+BF para uma mesma condição de corte podem ser atribuídas ao fato de que a medição da rugosidade foi realizada em diferentes regiões da superfície.

A redução dos valores do parâmetro Rpk pode resultar em uma melhoria das propriedades de amortecimento da superfície do cilindro. Valores de Rk menores proporcionariam uma alta resistência mecânica e uma alta capacidade de carga durante as operações de contado (Stout et al, 1993). O parâmetro Rvk está associado às propriedades de superfície para retenção do filme lubrificante.

Os valores da incerteza expandida associados aos parâmetros da Família Rk não mostraram nenhuma tendência definida. O fator que mais contribuiu para a incerteza final em todas as condições investigadas foi a variabilidade de leituras.

Observa-se a partir da Fig. 4.19 que os valores médios dos parâmetros $Mr1$ e $Mr2$ foram ligeiramente reduzidos com a aplicação do brunimento flexível em todas as condições investigadas, a exceção se dá no Experimento 5 (três golpes da ferramenta e granulometria de 400 mesh) para o parâmetro $Mr1$, para o qual houve um pequeno crescimento em porcentagem de 8,4 % (0,9 %). Porém todos os valores encontrados antes e após o BF para $Mr1$ e $Mr2$ são estatisticamente iguais em todas as 6 condições investigadas, devido as barras de erros encontrarem-se parcialmente superpostas.

Para a incerteza de medição associada ao parâmetro $Mr1$ verificou-se o crescimento da incerteza final entre os processos BC e BC+BF para todas condições avaliadas. O Experimento 5 (cinco golpes ferramenta e granulometria de 400 mesh) foi aquele que verificou-se o maior aumento percentual da incerteza final de 243,5 % (1,7 %) e o Experimento 1 (um golpe ferramenta e granulometria de 400 mesh) praticamente se manteve constante para os dois processos. Para a incerteza final associado ao parâmetro $Mr2$ verificou-

se o seu crescimento em todas as condições de corte investigadas. No Experimento 5 (cinco golpes da ferramenta e granulometria 400 *mesh*) foram observadas as maiores diferenças percentuais da incerteza final para os parâmetros *Mr1* e do parâmetro *Mr2* com crescimento de 45,5 % (0,7 %). O fator que mais contribuiu para a incerteza final dos parâmetros *Mr1* e *Mr2* em todas as condições investigadas foi a variabilidade de leituras.

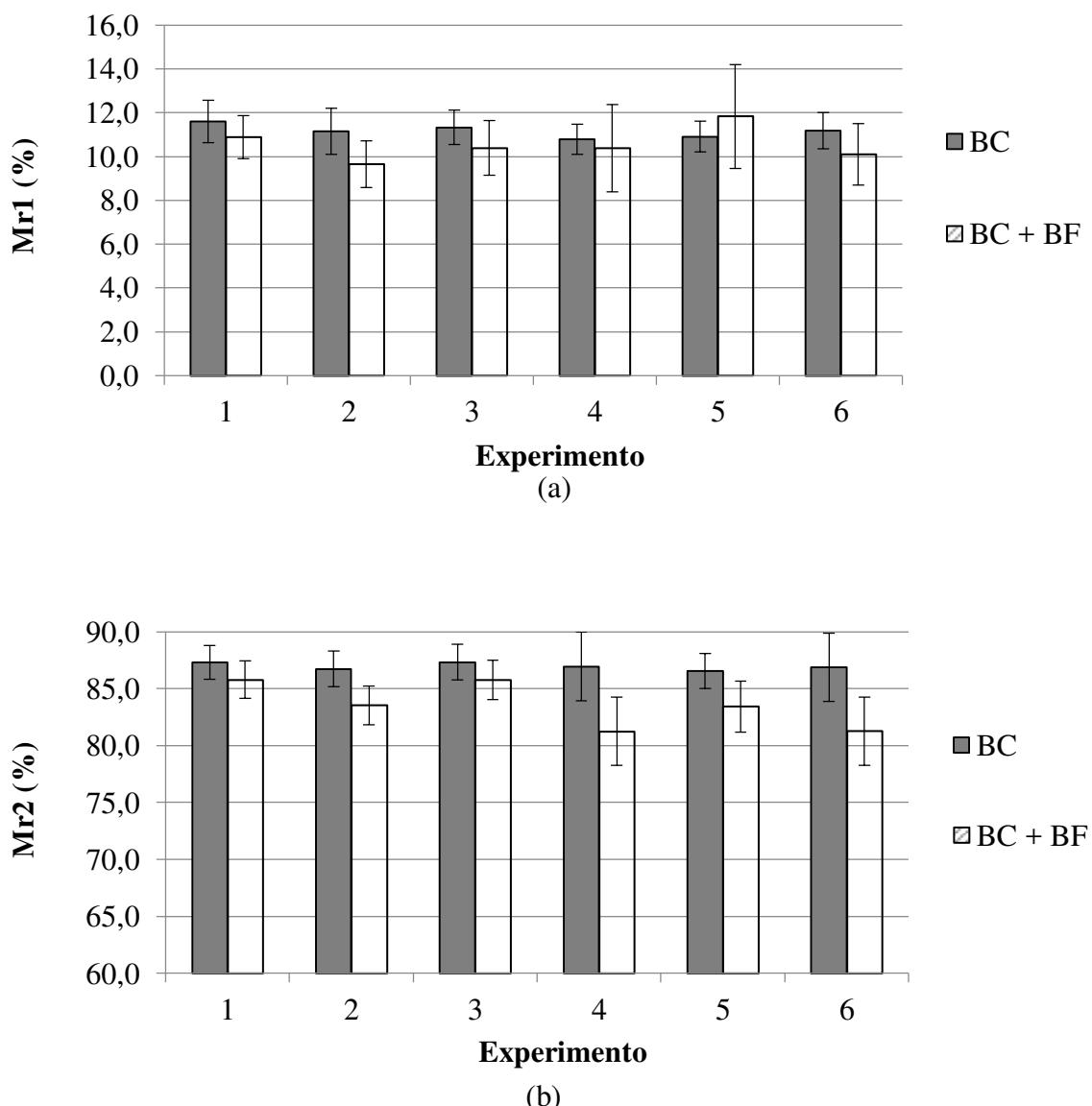


Figura 4.19 - Valores médios dos parâmetros (a) *Mr1* e (b) *Mr2* para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

A seguir são mostradas as curvas de *Abbott-Firestone* referente ao cilindro do bloco 30, Experimento 1, após o BC (Fig. 4.20a) e BC+BF (Fig. 4.20b), usinado com as condições de 400 *mesh* o tamanho do grão abrasivo e 1 golpe da ferramenta.

A curva de *Abbott-Firestone* mostrada na Fig. 4.20a, relativa ao cilindro do bloco 30 usinado pelo BC, mostra que 10 % do material do cilindro, corresponde a aproximadamente 0,44 μm da altura do perfil. De 0,44 μm a 1,15 μm de altura, encontra-se aproximadamente 80 % do material, restando para 1,15 μm os últimos 10 % de material. Já a curva obtida na Fig. 4.20b, mostra a curva após o Experimento 1 do brunimento flexível, revela que 10 % do material está localizado em aproximadamente 0,50 μm , enquanto que aproximadamente 80 % de material está entre 0,50 μm e 1,10 μm de altura, e os 10 % restantes de material encontram-se em 1,10 μm de altura, aproximadamente.

É possível observar também na Fig. 4.20, os valores relativos ao percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os picos da rugosidade central, parâmetro *Mr1*, e que separa os vales da rugosidade central, parâmetro *Mr2*. Para o parâmetro *Mr1* os valores antes e após o brunimento flexível são 8,28 % e 10,8 %, respectivamente. O parâmetro *Mr2* teve uma pequena variação de 87,2 % para 87,8 % após o brunimento flexível. Ambos os parâmetros determinam a fração de contato a uma determinada profundidade.

Verifica-se que os parâmetros *Rpk* e *Rvk* representam as cotas verticais dos picos e vales, respectivamente, calculados como a altura do cateto vertical do triângulo-retângulo mostrado na figura. Dessa forma, a área do triângulo localizado na região superior da curva denominada com *A1*, equivale ao *Mr1*, enquanto que a área do triângulo da região inferior da curva denominada como *A2*, equivale ao *Mr2*. É mostrado na figura que a área *A1* foi reduzida após o brunimento flexível, de 10,7 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 9,2 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, e a área *A2* foi reduzida de 25,1 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 24,5 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, com o processo de BF.

É possível constatar que a área *A1* e o *Mr1* são significativamente menores após o BC+BF, enquanto a área *A2* e o *Mr2* não apresentaram uma variação relevante.

Levando em consideração que a ação de alisamento da superfície é mais significativa que a ação de criação de novas irregularidades na superfície do cilindro, é possível acompanhar a ação de alisamento com a redução dos valores de *Rpk* de 0,26 μm para 0,17 μm . Além desta redução da região de picos do perfil, ocorre a redução da região central *Rk* de 0,71 μm para 0,50 μm . Já a região de vale *Rvk* praticamente sem alteração sendo 0,39 μm antes e 0,40 μm após o BC+BF, devido ao processo de BF não afetar a região de vale.

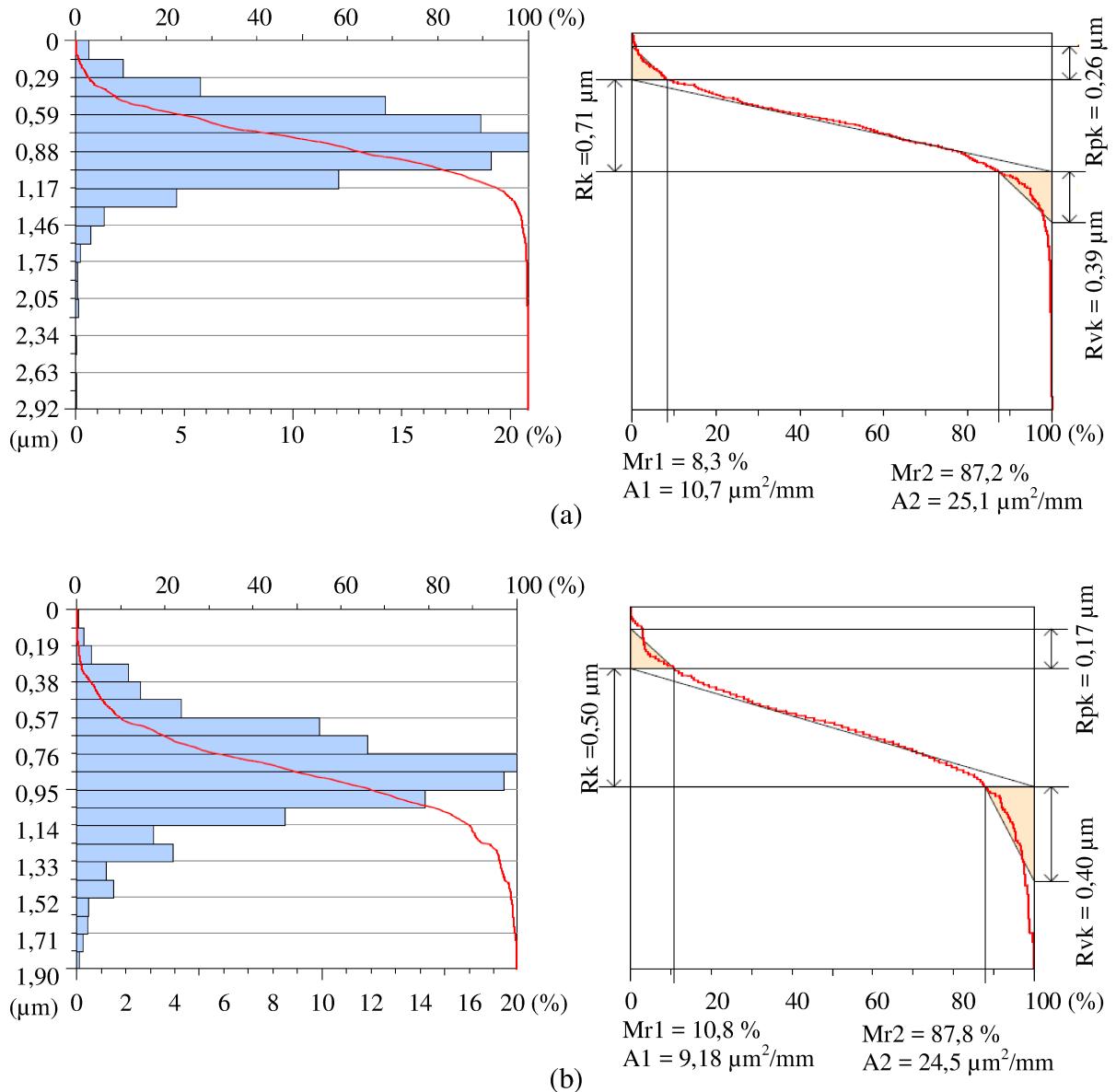


Figura 4.20 - Curvas de Abbott-Firestone referente ao cilindro do bloco 30 (a) após brunimento convencional e (b) após o Experimento 1 de brunimento flexível.

Observando a Fig. 4.20 é possível identificar a mudança geral na forma da curva à medida que ocorre a usinagem do cilindro, através da inclinação da curva da região central, sendo a inclinação da Fig. 4.15a maior do que a observada após o BF na Fig. 4.20b. A alteração da inclinação da região central está ligada diretamente a redução do parâmetro Rk e representa a tendência à concentração da área na região de contato da superfície brunida. O

desgaste ocorrido no perfil da região de pico, Rpk , é responsável por indicar o amaciamento da superfície, ou seja, a remoção dos picos do perfil.

Por sua vez, a pequena variação do parâmetro Rvk antes e após o brunimento flexível, indica que a presença de vales para a retenção de fluídios lubrificantes na superfície não foi alterada, mantendo quase inalterada a capacidade de lubrificação.

A seguir são mostradas as curvas de *Abbott-Firestone* referente ao cilindro do bloco 2, Experimento 2, após o BC (Fig. 4.21a) e após o BC+BC (Fig. 4.21b), usinado com as condições de 800 *mesh* o tamanho do grão abrasivo e 1 golpe da ferramenta, isso é, alterando somente a granulometria da ferramenta, ao caso anterior discorrido.

A curva de *Abbott-Firestone* mostrada na Fig. 4.21a, relativa ao cilindro do bloco 2 usinado pelo BC, observa-se que 10 % do material do cilindro, corresponde a aproximadamente 0,80 μm da altura do perfil. De 0,80 μm a 1,50 μm de altura, encontra-se aproximadamente 80 % do material, restando os últimos 10 % de material com 1,50 μm . A curva obtida curva após o Experimento 2 do brunimento flexível na Fig. 4.21b, revela que 10 % do material está localizado em aproximadamente 0,37 μm , enquanto que por volta de 80 % de material está entre 0,37 μm e 0,87 μm de altura, e a 0,87 μm de altura encontram-se os 10 % restantes de material.

É possível observar também na Fig. 4.21, os valores relativos ao percentual do parâmetro $Mr1$ e o parâmetro $Mr2$. Para o parâmetro $Mr1$ os valores foram reduzidos após o brunimento flexível de 13,8 % para 10,9 %. O parâmetro $Mr2$ teve uma variação de 88 % para 83,9 % após o brunimento flexível. É mostrado ainda, que a área $A1$ foi reduzida após o brunimento flexível, de 23 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 10,4 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, e a área $A2$ aumentou de 22,5 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 28,6 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, com o processo de BF.

É possível observar também na Fig. 4.21 a evolução dos parâmetros da Família Rk . A região de pico teve seu valor alterado de 0,34 μm para 0,19 μm , indicando a remoção de picos na superfície do cilindro devido à diminuição do valor Rpk . Outra redução ocorre na região central Rk de 0,62 μm para 0,37 μm . Já a região de vale Rvk teve uma pequena variação, de 0,38 μm para 0,36 μm após o brunimento flexível, esse pequena variação pode indicar medições em locais diferentes, pois o processo de BF não afeta a região de vale.

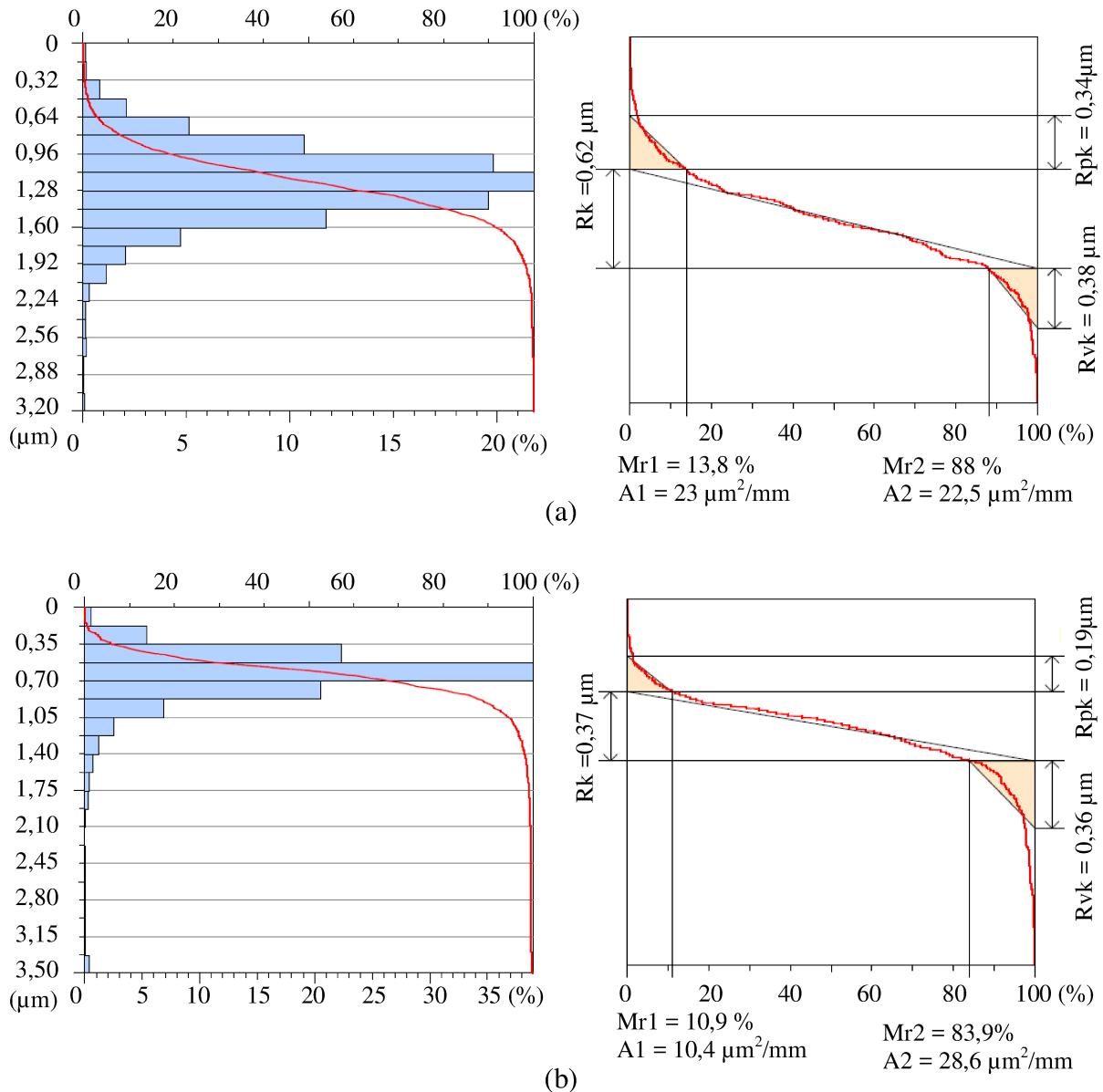


Figura 4.21 - Curvas de Abbott-Firestone referente ao cilindro do bloco 2 (a) após brunimento convencional e (b) após Experimento 2 de brunimento flexível.

De acordo com as curvas dos blocos 30 (Fig. 4.20), realizado o Experimento 1 com os fatores investigados de tamanho do grão abrasivo 400 *mesh* e 1 golpe da ferramenta, e do bloco 2 (Fig. 4.21), realizado o Experimento 2 com os fatores investigados de partículas abrasivas de 800 *mesh* e 1 golpe da ferramenta, percebe-se a influência do fator investigado granulometria da ferramenta nos resultados obtidos para os parâmetros Rpk e Rk . Na condição do Experimento 1, para o bloco 30, os valores de Rpk teve uma redução de 34,6 %, enquanto na condição do Experimento 2, para o bloco 2, os valores de Rpk teve uma redução de 44,1 %. Os valores de Rk para o bloco 30 teve uma redução de 29,6 % e para o bloco 2 a redução foi

de 40,3 %. Já para os valores de Rvk , praticamente constantes para os dois experimentos, ratifica a principal característica do brunimento flexível que não altera a região de vale da superfície.

Esta variação dos parâmetros Rpk e Rk após a mudança de uma condição de usinagem da granulometria da ferramenta indica uma melhora nos parâmetros em questão quando se diminui o tamanho do grão abrasivo, devido a uma quantidade maior de glóbulos abrasivos em contato com a superfície durante o processo de BF.

A seguir são mostradas as curvas de *Abbott-Firestone* referente ao cilindro do bloco 15, Experimento 6, após o brunimento convencional (Fig. 4.22a) e após o brunimento flexível (Fig. 4.22b), com as condições de usinagem granulometria da ferramenta de 800 mesh e 3 golpes da ferramenta.

A curva de *Abbott-Firestone* da Fig. 4.22a, relativa ao cilindro do bloco 15 usinado pelo BC, observa-se que 10 % do material do cilindro corresponde a aproximadamente 1,15 μm da altura do perfil. De 1,15 μm a 1,80 μm de altura, encontra-se aproximadamente 80 % do material, restando os últimos 10 % de material com 1,80 μm . A curva obtida curva após o Experimento 6 do brunimento flexível na Fig. 4.22b, revela que 10 % do material está localizado em aproximadamente 0,12 μm , enquanto que por volta de 80 % de material está entre 0,12 μm e 0,44 μm de altura, e a 0,44 μm de altura encontram-se os 10 % restantes de material.

É possível observar também na Fig. 4.22, que os valores relativos ao percentual do parâmetro $Mr1$ foram reduzidos após o brunimento flexível de 11 % para 7,85 %. O parâmetro $Mr2$ teve uma variação de 85,9 % para 80,2 % após o brunimento flexível. Mostrado ainda, que a área $A1$ foi reduzida após o brunimento flexível, de 20,6 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 3,45 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, e a área $A2$ aumentou de 22,2 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$ para 30,4 $\mu\text{m}^2/\text{mm}$, com o processo de brunimento flexível do Experimento 6.

É possível observar também na Fig. 4.22 a evolução dos parâmetros da Família Rk . A região de pico teve seu valor alterado de 0,37 μm para 0,09 μm , indicando a remoção de picos na superfície do cilindro devido à diminuição do valor Rpk . Outra redução ocorreu na região central Rk de 0,60 μm para 0,28 μm . Já a região de vale Rvk teve uma insignificante variação, de 0,32 μm para 0,31 μm após o brunimento flexível, esse pequena variação pode indicar medições em locais diferentes, pois o processo de brunimento flexível não afeta a região de vale.

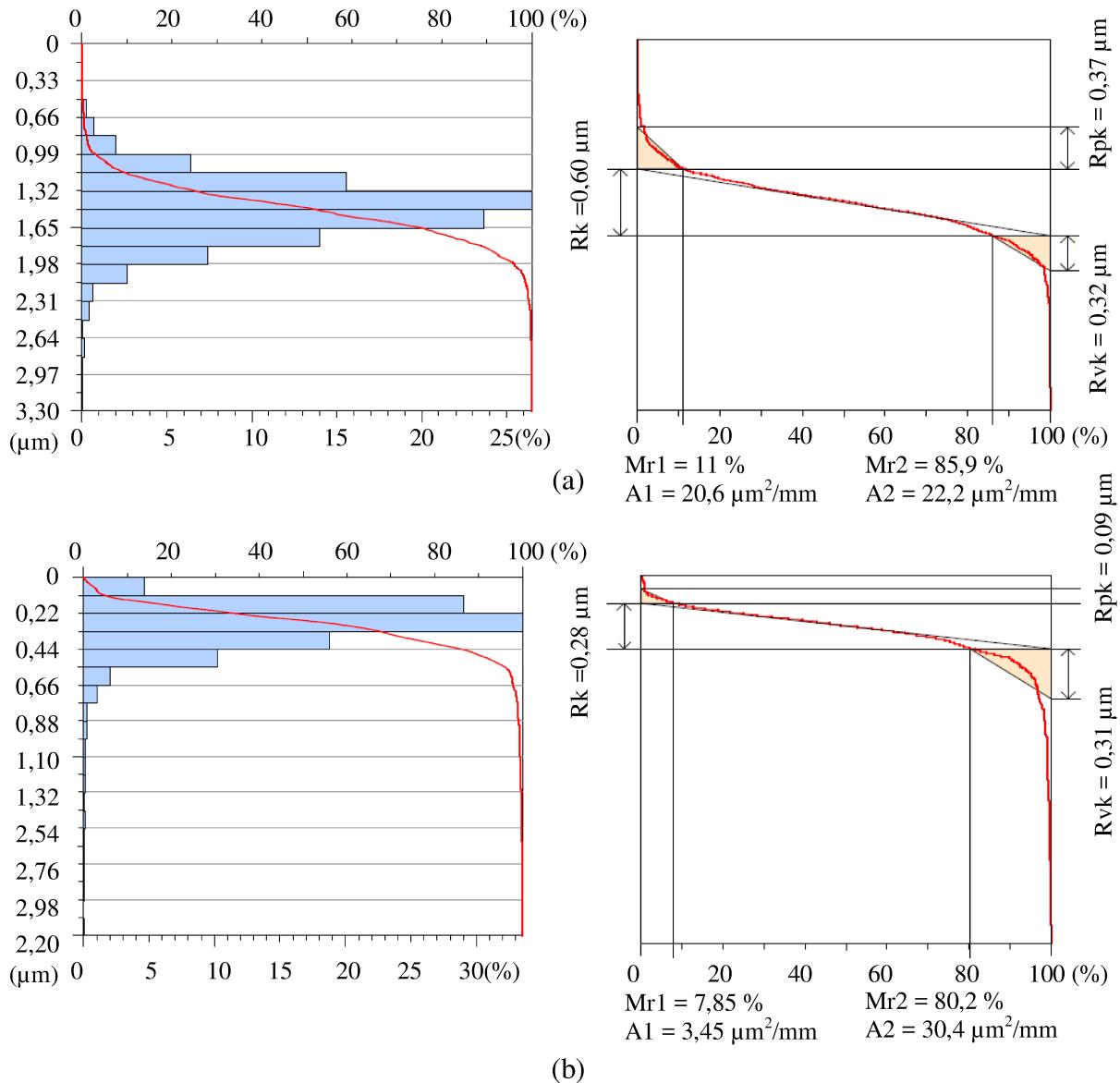


Figura 4.22 - Curvas de Abbott-Firestone referente ao cilindro do bloco 15 (a) após brunimento convencional e (b) após Experimento 6 de brunimento flexível.

De acordo com as curvas dos blocos 2 (Fig. 4.21), realizado o Experimento 2 com os fatores investigados de tamanho do grão abrasivo 800 *mesh* e 1 golpe da ferramenta, e do bloco 15 (Fig. 4.22), realizado o Experimento 6 com os fatores investigados de partículas abrasivas de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta, percebe-se a influência do fator investigado número de golpes da ferramenta nos resultados obtidos para os parâmetros Rpk e Rk , sendo o efeito na região de pico de maior evidência. Na condição do Experimento 2, para o bloco 2, os valores de Rpk tiveram uma redução de 44,1 %, enquanto na condição do Experimento 6, para o bloco 15, os valores de Rpk tiveram uma redução de 76,6 %. Os valores de Rk para o bloco

2 tiveram uma redução de 40,3 % e para o bloco 15 a redução foi de 53,4 %. Já a pequena variação dos valores de Rvk para os dois experimentos, demonstra que o brunimento flexível não altera a região de vale da superfície.

Esta variação dos parâmetros Rpk e Rk após a mudança da condição de usinagem de 1 golpe para 5 golpes da ferramenta brunidora, e mantendo a granulometria da ferramenta em 800 *mesh*, indica uma melhora nos parâmetros em questão quando se aumenta o número de golpes, devido ao maior tempo de contato da ferramenta brunidora com a superfície durante o processo de brunimento flexível.

A Figura 4.23 mostra a diferença entre os valores médios dos parâmetros rugosidade da Família Rk obtidos antes e após o brunimento flexível. O Experimento 5 (granulometria de 400 *mesh* e 5 golpes da ferramenta), e o Experimento 6 (granulometria de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta), foram aqueles que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rpk entre os processos de BC e BC+BF, sendo em média 34,1 % (0,081 μm) e 70,2 % (0,223 μm), respectivamente, Fig. 4.23a.

Os Experimentos 1 (um golpe da ferramenta e granulometria de 400 *mesh*) e 6 (cinco golpes da ferramenta e granulometria de 800 *mesh*) foram aqueles que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rk entre os processos de BC e BC+BF, sendo em média 29,6 % (0,169 μm) e 61,4 % (0,401 μm), respectivamente, Fig. 4.23b.

Na Figura 4.23c, nota-se que o Experimento 1 (um golpe da ferramenta e granulometria de 400 *mesh*) obteve um aumento percentual de 22,8 % (0,078 μm), já o Experimento 5, (5 golpes da ferramenta e granulometria de 400 *mesh*) foi o que proporcionou a maior redução em diferença percentual na rugosidade Rvk entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média 27,2 % (0,136 μm).

Baixos valores de Rk indicam uma alta resistência mecânica e alta capacidade de suportar cargas em operações de contato. Portanto o processo de brunimento flexível atenuou estas características da superfície do cilindro. Os valores médios de Rk se mostraram dependente das condições de usinagem, e apresentou-se comportamento bem próximo aos verificados pelos parâmetros Ra e Rq .

O aumento dos valores de Rvk indica uma melhoria das propriedades da superfície para a retenção de lubrificantes, enquanto a redução, o inverso. No entanto, o brunimento flexível não alterou o parâmetro Rvk , deixando praticamente inalterada a profundidade dos vales. As diferenças observadas podem ser justificadas porque a medição foi efetuada em locais diferentes, também porque a linha média se deslocou no sentido dos vales.

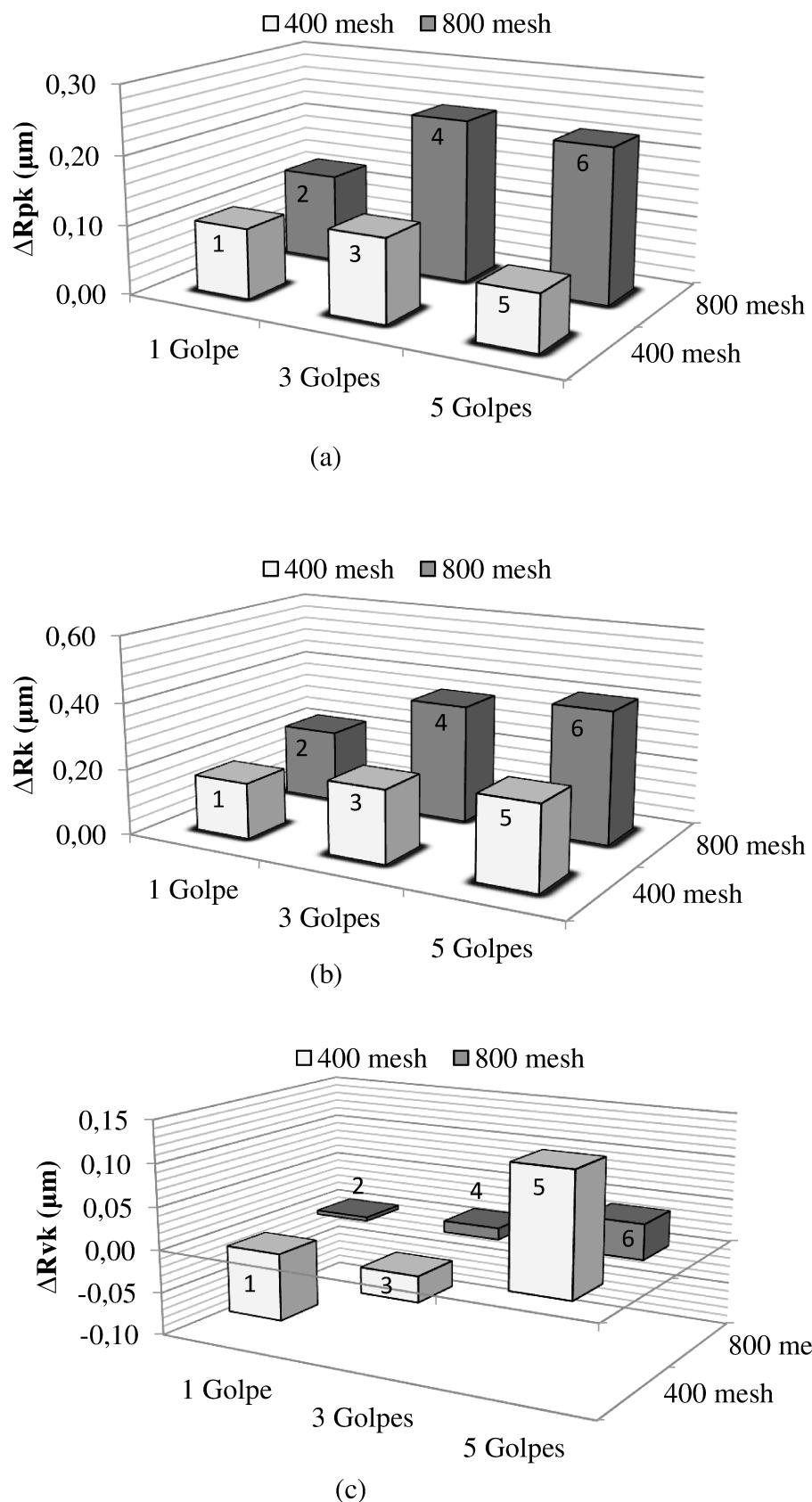


Figura 4.23 - Diferença entre os valores médios obtidos antes e após o brunitimento flexível para cada experimento dos parâmetros (a) R_{pk} , (b) R_k e (c) R_{vk} .

A Figura 4.24 mostra a diferença entre os valores médios dos parâmetros $Mr1$ e $Mr2$ para cada experimento antes e após o processo de usinagem do brunimento flexível. Na fig. 4.24a, os Experimentos 2 e 5 foram os que chamaram maior atenção para a diferença percentual do parâmetro $Mr1$ entre os processos de BC e BC+BF. O Experimento 2 (1 golpe da ferramenta e granulometria 800 *mesh*) teve a maior redução percentual de 15,6 % (1,7 %) após o brunimento flexível. O Experimento 5 (5 golpes da ferramenta e granulometria 400 *mesh*) mostrou um aumento de 8,4 % (0,9 %) do parâmetro $Mr1$. Na Figura 4.24b, os Experimentos 4 e 6 foram os que tiveram a maior redução percentual do parâmetro $Mr2$ entre os processos de BC e o BC+BF, aproximadamente 6,5 %, com o fator comum dos dois experimentos a granulometria de 800 *mesh*. Os Experimentos 1 e 3 tiveram a menor redução percentual de aproximadamente 1,9 % após o brunimento flexível, com o fator comum do tamanho das partículas abrasivas de 400 *mesh* para o parâmetro $Mr2$.

As Tabelas 4.7 a 4.9 mostram os resultados das ANOVAs para as diferenças encontradas entre os valores dos parâmetros Rpk , Rk e Rvk obtidos antes e após o brunimento flexível, respectivamente.

Percebe-se na Tabela 4.7 que os fatores granulometria da ferramenta brunidora (GR) e o número de golpes (NG) introduziram efeitos estatisticamente significativos nos valores da variável resposta Rpk para uma confiabilidade de 95 %. Dentre eles, o que mais introduziu efeito no parâmetro investigado foi o tamanho das partículas abrasivas ou granulometria (GR), já ao contrário do resultado da ANOVA para o parâmetro Rk a interação entre os dois fatores (GR x NG) não provocou efeito significativo na resposta Rpk .

Da Tabela 4.8 pode ser observado que o fator granulometria da ferramenta brunidora (GR) e a interação entre os dois fatores (GR x NG) introduziram efeitos estatisticamente significativos nos valores da variável resposta Rk para uma confiabilidade de 95 %. Dentre eles, o que mais introduziu efeito no parâmetro investigado foi o tamanho das partículas abrasivas ou granulometria (GR). O fator número de golpes não produziu efeitos significativos na variável resposta Rk .

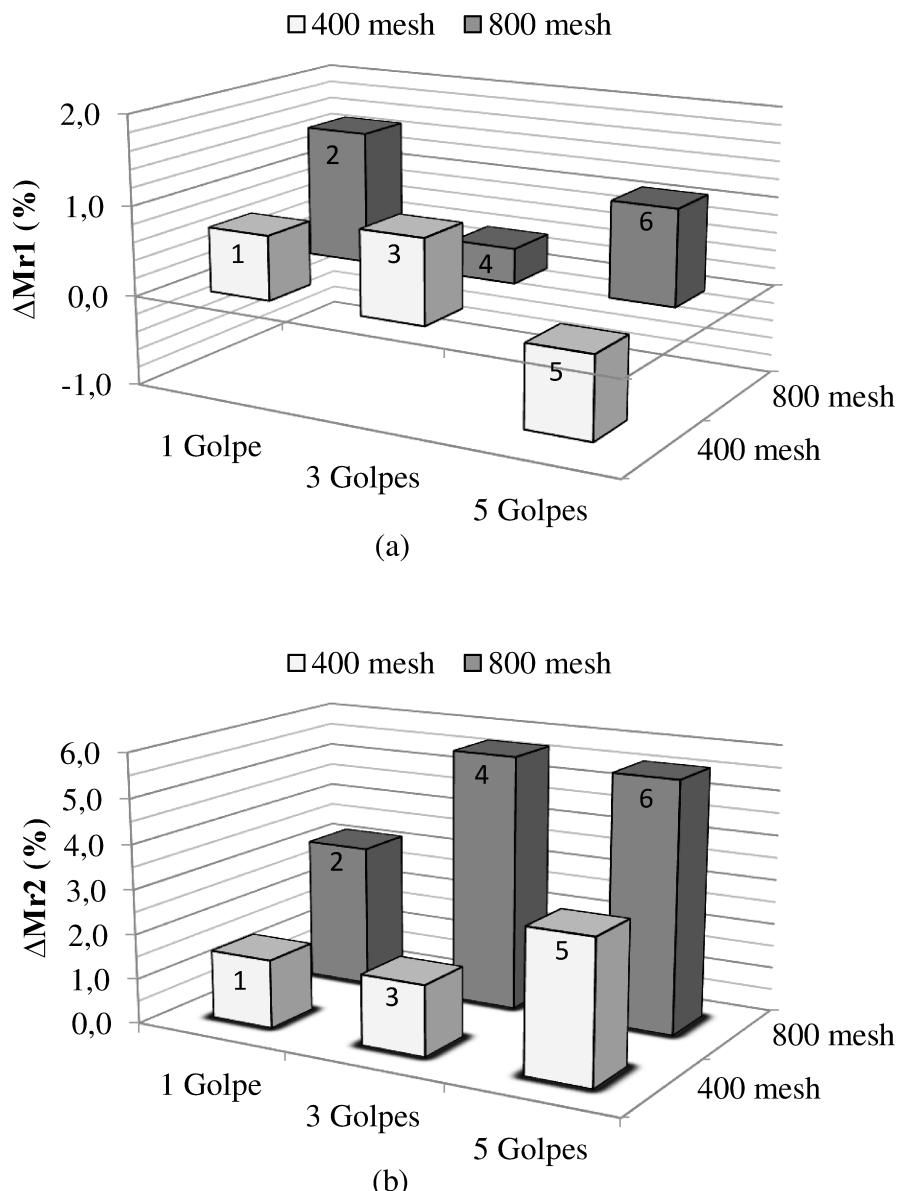


Figura 4.24 - Diferença entre os valores médios obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento dos parâmetros (a) $Mr1$ e (b) $Mr2$.

A partir da Tabela 4.9 pode ser notado que nenhum dos fatores, bem como a interação entre os dois fatores (GR x NG) não introduziram efeitos estatisticamente significativos na variável resposta Rvk . Comprovando que os fatores investigados não influenciam na região de vale do perfil de rugosidade dos cilindros.

Tabela 4.7 - ANOVA da diferença do parâmetro Rpk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rpk	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,070238	1	0,070238	32,4320	0,000007
Nº de golpes (NG)	0,026829	2	0,013415	6,1941	0,006777
GR x NG	0,008570	2	0,004285	1,9786	0,160185
Erro	0,051977	24	0,002166		

Tabela 4.8 - ANOVA da diferença do parâmetro Rk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rk	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,105970	1	0,105970	25,3061	0,000038
Nº de golpes (NG)	0,023736	2	0,011868	2,8342	0,078525
GR x NG	0,068023	2	0,034011	8,1221	0,002023
Erro	0,100500	24	0,004188		

Tabela 4.9 - ANOVA da diferença do parâmetro Rvk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

Rvk	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,002463	1	0,002463	0,21924	0,643843
Nº de golpes (NG)	0,070218	2	0,035109	3,12582	0,062165
GR x NG	0,057399	2	0,028699	2,55515	0,098622
Erro	0,269567	24	0,011232		

A redução dos picos do perfil de rugosidade leva a menores valores de Rk , proporcionando uma menor inclinação da região central da curva de Abbott-Firestone, Fig. 4.21, que representa a tendência à concentração da área de contato da superfície brunida. Esta mudança na forma da curva é proporcionada pela variação dos fatores de usinagem.

Para o parâmetro Rpk o aumento dos fatores granulometria e número de golpes da ferramenta brunidora flexível promoveram um maior desgaste na região de pico, que é responsável pelo amaciamento da superfície. Também pode ser visto na curva de Abbott-Firestone, Fig. 4.21, a redução da porção dos picos protuberantes acima da rugosidade central, e também na Tab. 4.7 que apresenta o resultado da ANOVA para o parâmetro Rpk .

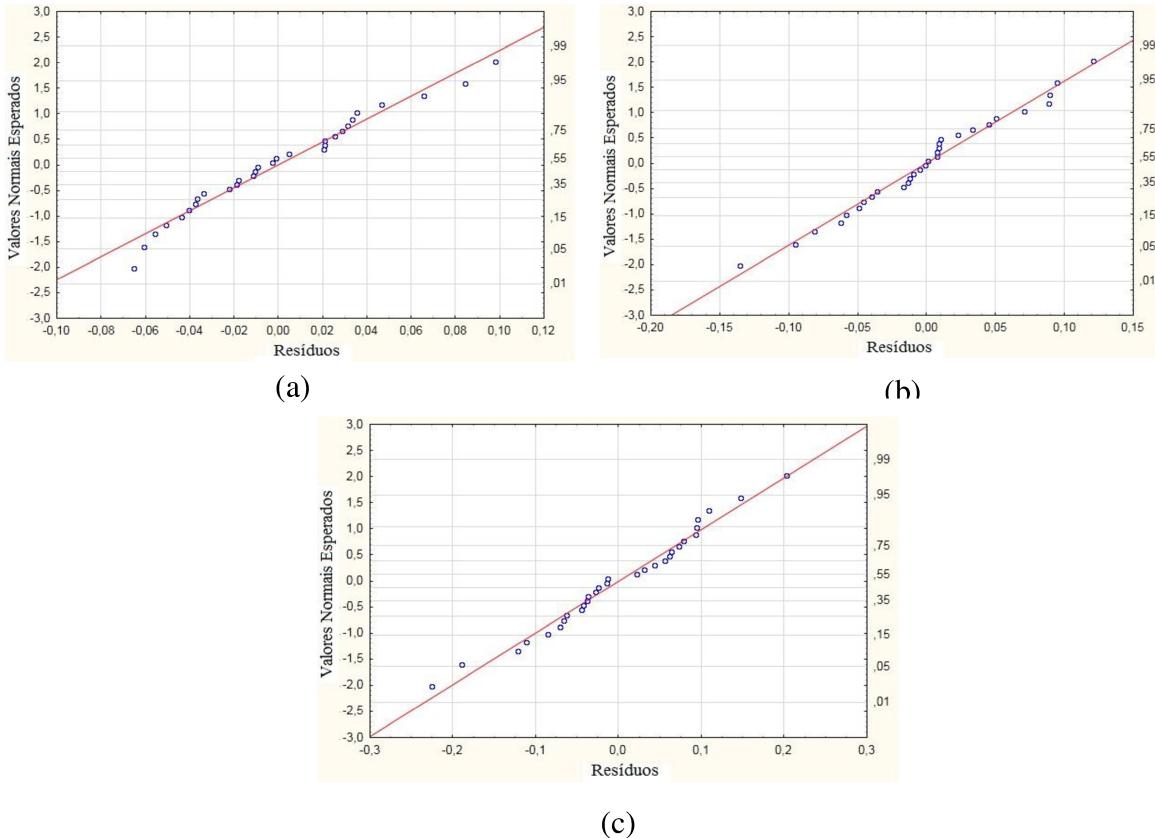


Figura 4.25 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença dos parâmetros (a) Rpk , (b) Rk e (c) Rvk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

As pequenas diferenças apresentadas para os valores do parâmetro Rvk entre os processos de BC e BC+BF, levam a conclusão que os fatores investigados na usinagem não influenciaram na região de vale, como pode ser verificado na curva de *Abbott-Firestone*, Fig. 4.21, e também na Tab. 4.9 que mostra o resultado da ANOVA para a variável Rvk .

A Figura 4.25 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença dos parâmetros Rpk , Rk e Rvk de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível, nota-se que os resíduos têm distribuição próxima e acompanha a probabilidade normal para os três parâmetros avaliados.

São mostrados nas Tabelas 4.10 e 4.11 os resultados das ANOVAs para as diferenças encontradas entre os valores obtidos antes e após o brunitimento flexível dos parâmetros $Mr1$ e $Mr2$. Na Tabela 4.10 pode ser observado para o $Mr1$ que nenhum fator ou interação provocou efeitos. Percebe-se na Tab. 4.11 para a variável resposta $Mr2$ que somente o fator investigado

granulometria da ferramenta brunidora (GR) provocou efeitos estatisticamente significativos com confiabilidade de 95 %.

Tabela 4.10 - ANOVA da diferença do parâmetro $Mr1$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

$Mr1$	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	4,9678	1	4,96784	0,896710	0,353103
Nº de golpes (NG)	1,9326	2	0,96630	0,174419	0,841000
GR x NG	12,9358	2	6,46792	1,167479	0,328204
Erro	132,9618	24	5,54008		

Tabela 4.11 - ANOVA da diferença do parâmetro $Mr2$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

$Mr2$	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	64,6507	1	64,6507	7,82229	0,010002
Nº de golpes (NG)	0,1522	2	0,0761	0,00921	0,990839
GR x NG	18,4849	2	9,2424	1,11827	0,343286
Erro	198,3584	24	8,2649		

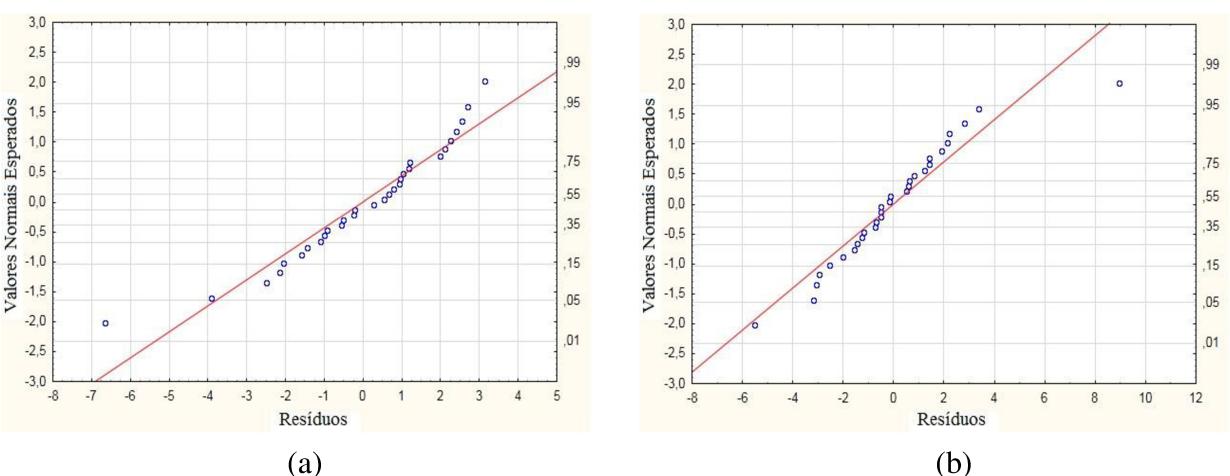


Figura 4.26 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença dos parâmetros (a) $Mr1$ e (b) $Mr2$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

A Figura 4.26 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença dos parâmetros $Mr1$ e $Mr2$ de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível, e verifica-se que os resíduos têm distribuição próxima a probabilidade normal para ambos os parâmetros avaliados.

4.7. Coeficiente de vazio (CV)

São mostrados na Fig. 4.27 os valores médios de CV dos cilindros usinados pelo brunimento convencional (BC) e brunimento convencional acrescido do brunimento flexível (BC+BF) nas 6 (seis) condições investigadas, com barras de erros associadas à incerteza expandida (95 %). No APÊNDICE XI são apresentados o valor médio, o desvio-padrão (68,27 %) e a incerteza expandida (95 %) para todos os 30 blocos antes e após o brunimento flexível.

Tem-se a partir da Fig. 4.27 que os valores médios do parâmetro de CV foram reduzidos de maneira significativa após o brunimento flexível para a maioria das condições investigadas. As exceções foram os Experimentos 1 e 5 (ambos com granulometria de 400 *mesh* e 1 e 5 golpes, respectivamente). Para esses casos as barras de erros que representam a incerteza expandida encontram-se parcialmente superpostas.

O Experimento 1 (um golpe da ferramenta e granulometria de 400 *mesh*) foi o que resultou na menor diferença percentual do parâmetro CV entre os processos de BC e BC+BF, sendo em média de 26,6 % (0,058). O Experimento 6 (cinco golpes da ferramenta e granulometria de 800 *mesh*) mostrou a maior diferença dos valores médios de CV como mostra a Fig. 4.28, sendo em média 56,3 % (0,164). O Experimento 4 (três golpes da ferramenta e granulometria de 800 *mesh*) obteve uma diferença do parâmetro CV entre os processos próximo ao observado no Experimento 6, sendo em média 52,6 % (0,177).

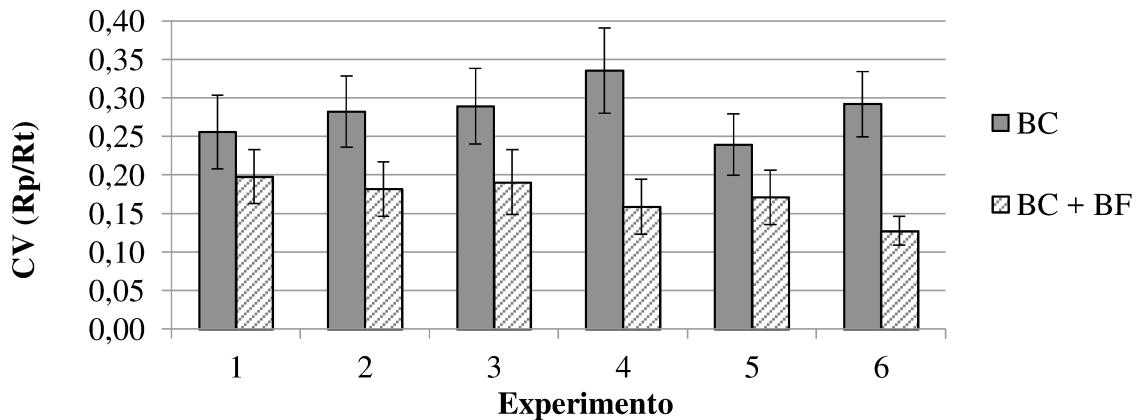


Figura 4.27 - Valores médios do parâmetro Rp/Rt para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %).

A Figura 4.28 mostra que a diferença entre os valores médios antes e após o brunimento flexível são maiores para os experimentos com a granulometria da ferramenta de 800 mesh, e quanto ao fator investigado número de golpes, não é possível observar tendência definida.

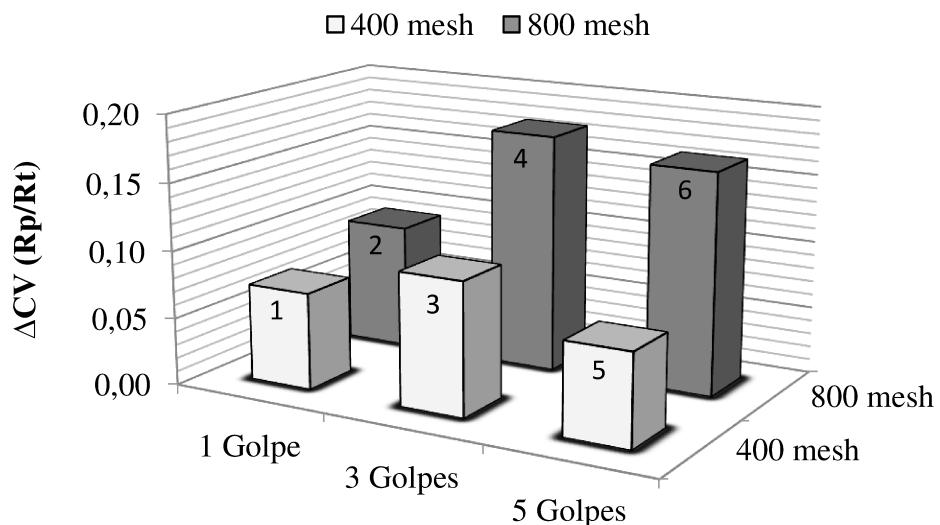


Figura 4.28 - Diferença entre os valores médios de Rp/Rt obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento.

É mostrado na Tabela 4.12 o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro CV obtidos nos processos BC e BC+BF. Nesta tabela pode ser observado que o fator investigado granulometria da ferramenta brunidora (GR) foi o fator que mais provocou efeito no parâmetro CV . Já o número de golpes (NG) foi o segundo fator a introduzir efeito no mesmo parâmetro, porém não de forma tão significativa quanto o fator GR. A interação entre os dois fatores (GR x NG) não acrescentou efeitos significativos na variável resposta CV .

Tabela 4.12 - ANOVA da diferença do parâmetro Rp/Rt de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

$CV (Rp/Rt)$	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,031682	1	0,031682	12,3692	0,001767
Nº de golpes (NG)	0,015132	2	0,007566	2,9538	0,071310
GR x NG	0,008070	2	0,004035	1,5753	0,227605
Erro	0,061472	24	0,002561		

Os valores encontrados para o coeficiente de vazio acompanham os valores observados para o parâmetro Rp , devido a sua relação direta para encontrar os mesmos valores do CV .

A Tabela 4.13 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95 %) do parâmetro CV para o cilindro do bloco 1, usinado pelo Experimento 2 pelo brunimento flexível. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variável associada à medição do parâmetro Rp e representa 56,6 % da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à variabilidade das leituras do parâmetro CV com 28,4 %. Para os outros blocos, após ambos os processos de brunimento flexível, os cálculos foram similares.

De acordo com a Tab. 4.13, a incerteza expandida para o coeficiente de vazio do cilindro do bloco 1, usinado com os fatores granulometria de 800 *mesh* e 1 golpe da ferramenta de brunimento flexível, é declarada como sendo 0,08 μm , relacionada com uma incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência k igual a 2,23, e para uma distribuição *T-Student* e probabilidade de abrangência de 95 %.

Tabela 4.13 - Resultados da avaliação da incerteza CV para o cilindro 1 e Experimento 2 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão
\bar{x}	0,22715	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,01780
ΔR_p	0,15	B	<i>T-Student</i>	4,3	0,45620	0,05507
ΔR_t	0,34	B	<i>T-Student</i>	4,2	0,10389	0,12426
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,03339
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						10
Fator de abrangência (k)						2,23
Incerteza expandida (U)						0,0745

A Figura 4.29 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a diferença do parâmetro CV de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível, foi verificada a tendência dos resíduos à distribuição próxima da probabilidade normal para o parâmetro CV .

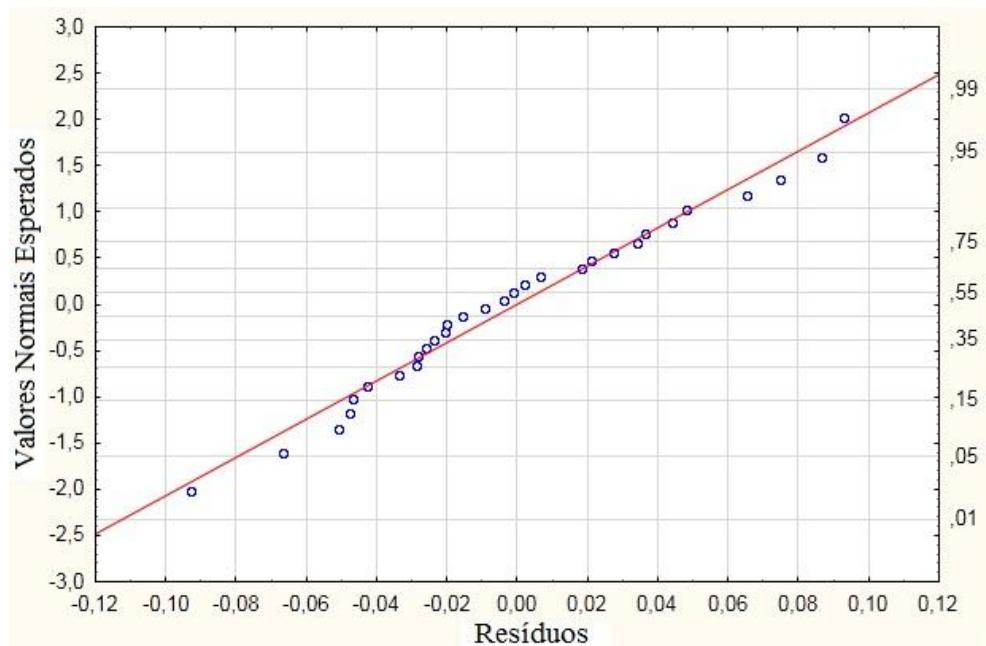


Figura 4.29 - Curva normal de probabilidade dos resíduos da diferença do parâmetro CV de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Ao finalizar o presente trabalho as seguintes conclusões podem ser formuladas:

- O processo mecânico de usinagem por brunimento flexível é recomendado após o brunimento convencional em cilindros de blocos de compressores herméticos, pois esta operação proporciona a eliminação de picos isolados e a redução destes, sem alterar a profundidade dos vales. Consequentemente, os valores dos parâmetros R_a , R_q , R_p , R_t , R_k e R_{pk} são reduzidos, o que pode ser indicativos de melhorias nas propriedades de amaciamento da superfície, de retenção de fluido lubrificantes, de resistência mecânica e da capacidade de suportar cargas em operações de contato.

- O fator Granulometria (GR) da ferramenta brunidora flexível foi a variável que provocou os maiores efeitos estatisticamente significativos nos valores dos parâmetros de rugosidade, afetando os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_{pk} , R_k , Mr_2 e CV .

- O fator Número de Golpes (NG) da ferramenta brunidora flexível provocou efeitos estatisticamente significativos em um número menor de parâmetros do que a GR, quais sejam: R_a e R_{pk} .

- A interação entre os fatores GR e NG provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores dos parâmetros R_a , R_q , R_p e R_k encontrados após o BC+BF, em menores proporções àquelas provocadas pelos fatores NG e GR para cada parâmetro.

- Os parâmetros R_v , R_t , R_{vk} e Mr_1 não foram afetados de forma estatisticamente significativa com a variação dos fatores investigados no presente trabalho.

- O Experimento 6 (5 golpes da ferramenta e granulometria de 800 *mesh*) proporcionou os melhores resultados nos parâmetros de rugosidade avaliados considerando a função dos cilindros de compressores herméticos.

- O Experimento 6 (granulometria 800 *mesh* e 5 golpes) possibilitou a obtenção de perfis muito similares ao obtidos por meio do brunimento platô o que pode aumentar o campo de aplicação do BF.

- Os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos com a ferramenta de granulometria 800 *mesh* e 1 golpe são similares aos obtidos com ferramenta de granulometria 400 *mesh* e 3 golpes. Com isto poderá ser melhorado o acabamento superficial dos cilindros sem a necessidade de aumentar o tempo dedicado a essa operação atualmente na linha de produção da EMBRACO.

- Os parâmetros médios de rugosidade R_a e R_q apresentaram maiores diferenças antes e após o BC com a combinação do aumento do número de golpes e a diminuição das dimensões das partículas abrasivas. Embora estes parâmetros isolados não sejam capazes de caracterizar uma superfície brunida, eles devem ser avaliados, pois são utilizados na indústria como referência padrão e são apresentados na maioria dos trabalhos sobre o assunto, servindo como base comparativa.

- Os parâmetros R_p , R_{pk} e R_k apresentaram menores valores para a superfície brunida com granulometria da ferramenta de 800 mesh e 5 golpes da ferramenta.

- Os valores praticamente inalterados dos parâmetros R_v e R_{vk} indicaram que o brunimento flexível não alterou a profundidade dos vales, com as condições investigadas.

- A redução do parâmetro R_t após o BC+BF foi caracterizada pela remoção dos picos isolados da superfície. Entretanto, este parâmetro é influenciado pela presença de vales isolados, o que justifica a elevada dispersão de seus valores médios após o processo, não sendo influenciado pelos fatores investigados.

- Por meio da relação entre os parâmetros R_p e R_t foi estimado o coeficiente de vazio CV , e este permitiu caracterizar de forma adequada as superfícies brunidas, uma vez que a redução dos picos do perfil diminui o período de amaciamento do compressor, podendo gerar menor desgaste. O fator granulometria da ferramenta provocou os maiores efeitos para este parâmetro. A redução do CV é indicativa da obtenção de superfícies mais lisas, o que pode proporcionar um aumento da resistência ao desgaste, e consequentemente maior eficiência e maior vida útil do compressor.

CAPÍTULO VI

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas conclusões apresentadas neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

1. Identificar qual o maior número de golpes da ferramenta flexível em que os cilindros ainda mantêm as características do brunimento.
2. Avaliar a qualidade geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível com diferentes fluidos de corte.
3. Avaliar a evolução do desgaste da superfície do cilindro em diferentes estágios da vida útil do compressor hermético, bem como a eficiência do mesmo, após a utilização do brunidor flexível nas condições investigadas neste trabalho.
4. Avaliar a possibilidade da substituição da ferramenta de brunimento convencional de acabamento (precidor) pelo brunidor flexível (*Flex-Hone*).

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARON, T. et al. "Grinding, Honing and Lapping". **ASM Handbook - Machining**. ASM International, 1995.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 1977. 295p.
- ANDERBERG, C.; PAWLUS, P.; ROSÉN, B.G.; THOMAS, T. R. Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1936-1942, fev. 2009.
- ANDRETTA, C. **Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. 2001. 76 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ARANTES, L. J.; FERNANDES, K. A.; SCHRAMM C.R. et al. The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes. **Int J Adv Manuf Technol**: 1-14. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Set. 2002. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4288, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. 2008. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO/IEC 17025, **Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração**. 2005. 20 p.

- BÄHRE, D.; SCHMITT, C.; MOOS, U. **Analysis of the differences between force control and feed control strategies during the honing of bores.** 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, p.377-381, 2012.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Planejamento e otimização de experimentos.** UNICAMP, Campinas, 1996. p.66.
- BARTON, K.; HAASIS, G. **Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing.** Technical publication of SME – Society of Manufacturing Engineers, 1993, 37p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 101 - **Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method**, 2008. 90p.
- BOOR, U. **Kuhlschmierstoffe zum Honen:** Teil 1. VDI-Z, Hamburg, n. 5. Mai. 1989a.
- BRM. **The Flex-Hone Tool**, Disponível em: <www.brushresearch.com/brushes.php?c1=1> Acesso em: 02 de maio de 2017
- BRUNITEC. Disponível em:<www.brunitec.com.br> Acesso em: 06 de outubro de. 2017.
- BRUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Sharter 2 Surface roughness analysis and measurement techniques. 2002. p.49-120.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados.** Programa Pós Graduação (Engenharia Mecânica), Campinas, SP, Brasil: UNICAMP 2012
- BUTTON, S. T. **Metodologia Para Planejamento Experimental E Análise De Resultados.** 2005. Disponível em: <www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.htm> Acessado em março de 2016.
- CGM GRUPO. **Brunimento**, Disponível em <www.ccmgrupo.com.br/index.php/site/page?view=produto_brunimento> Acesso em 02 de maio de 2017
- CHAND, M.; MEHTA, A.; SHARMA, R.; OJHA, V. N.; CHAUDHARY, K.P. Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument – A comparative study. **Indian journal of pure & applied physics**, v. 49, p. 335-339, 2011.
- CHANDLER, H. E. et al - **ASM Handbook** - Metals Handbook: Machining, v. 16 – 9 ed. Materials Park: ASM International, 1987, p. 472-491.
- CLARK, J. R.; GRANT, M. B. The effect of surface finish on component performance. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 32, p. 57-66, abri. 1992.
- CORRAL, I. B.; CALVET, J. V. Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools. **Precision Engineering**, v. 35, p. 289-293, abr, 2011.

- CORRAL, I. B.; CALVET, J. V.; SALCEDO, M. C. Modelling of surfasse finish and material removal rate in rough honing. **Precision Engineering**, v. 38, p. 100-108, jan. 2014.
- CORRAL, I. B.; CALVET, J. V.; SALCEDO, M. C. Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Barcelona, Vol. 50, p. 621-629. 27 mar. 2010.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V, **DIN 8580: Manufacturing Process - Terms and Definitions**. Germany, 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, EN DIN 848, 1965.
- DYNAROWSKI, R.; NOWICKI, B. Investigation on non-conventional honing of sculptured surfaces for parts made of alloy steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, p. 270-276, fev. 2001.
- EMBRACO. **Compressores Herméticos - Aspectos Gerais**. Material de treinamento da EMBRACO. Joinville, 1990.
- ETSION, I. "State of the art in laser surface texturing," ASME J. Tribol., vol. 127, no. 1, pp. 248–253, 2005.
- FEDERATION OF THE EUROPEAN PRODUCERS OF ABRASIVES, FEPA, homepage, <www.fepa-abrasives.org>
- FERNANDES, K. A. **Avaliação da Qualidade Dimensional e Geométrica de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos Usinados pelo Processo de Brunimento Flexível**. 2014, 139 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- FISCHER, H.; BYRNES, J. **Honing with superabrasives**. Society of Manuracturing Engineers. Dearborn, 1991.
- FLORES, G. **Diamond and CBN honing technology**. Society of Manufacturing Engineers. 1998, 9p.
- GEHRING. **Product Line Abrasives**. Publicação técnica. Ostfildern, n. 09/2003. 2003. 12p.
- GHOSH, A.; CHATTOPADHYAY, A. K. **On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel**. Industrial Diamond Review. 1/07. p. 59-64, 2007.
- HAASIS, Gerhard. **New honing potentialities with diamond tools**. In: PROCEEDINGS OF INDUSTRIAL DIAMOND CONFERENCE. Anais. London: Industrial Diamond Information Bureau. p. 37-50, [ca. 1975b].
- HILLE, L.; FIGUEIREDO, G. J.; CONRAD, S. L. **Brunimento**. Joinville. 1990
- HINTERMANN, H. E.; CHATTOPADHYAY, A. K. **New generation uperabrasive tool with monolayer configuration**. Diamond and Related Materials. 1/1992. p.1131-1143, 1992.

- INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados.** Rio de Janeiro, Brasil, 2012. 95p.
- INMETRO. A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo.** INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO. Nota técnica, 2008. 34p.
- INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION, “ISO 6106: Abrasive products - Checking the grit size of super abrasives,”** International standard, 1979.
- JOCSAK, J.; WONG, V. W.; TOMANIK, E.; TIAN, T.** The characterization and simulation of cylinder liner surface finishes. **ASME 2005 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference.** Chicago, IL, USA, abr. 2005.
- JUCHEN, H. O. Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstücken mit Diamant und CBN.** De Beers Indrustrie-Diamanten: Dusseldorf. Diamant Information M8, 1986. 15 p.
- JUCHEN, H. O. Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstücken mit Diamant und CBN.** De Beers Indrustrie-Diamanten: Dusseldorf. Diamant Information M8, 1986. 15 p.
- JUNIOR, R. F. M. Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna.** 2009. 65 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- KLEBER, M. Kühlsmierstoffe: Analytisch-chemische Charakterisierung und Untersuchungen zur mutagenen Wirkung.** 2000. Tese – Fachbereich Chemie, Universitat Dortmund, Dortmund, 2000.
- KLINK, U. Fachgebiete in Jahresubersichten: Honen.** VDI-Z. v. 123, n. 15/16, p.661-671, 1981.
- KLINK, U. Fachgebiete in Jahresubersichten: Honen.** VDI-Z. v. 125, n. 14, p.595-603, 1983.
- KLINK, U. Fachgebiete in Jahresubersichten: Honen.** VDI-Z. v. 131, n. 9, p. 94-101, 1989.
- KLINK, U. Fachgebiete in Jahresubersichten: Honen.** VDI-Z. v. 131, n. 9, p. 94- 101, 1989.
- KNOPF, M.; EIGLMEIER, C.; MERKER, G. P. Calculation of unsteady hydrodynamic lubrication and surface contact at the piston-ring/cylinder-liner interface.** Society of Automotive Engineers. 1998. ISSN 0148-7191.
- KOERICH, G. B. Medição de perdas termodinâmicas em compressores herméticos para refrigeração.** 2004. Monografia de projeto de fim de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

- KONIG, W. **Fertigungsverfahren II: Schielen**, Honen und Lappen. Dusseldorf: VDI, 3. ed, 1989. 381 p.
- KONIG, W. **Tecnologia da fabricação II: Retificação, brunimento e lapidação**. v. 2. Tradução: Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis: UFSC. . Título original: Fertigungsverfahren 2: Schielen, Honen und Lappen. 1980.
- LEAL, J. E. S. **Avaliação da Incerteza em Processos Complexos de Medição Utilizando o Método de Monte Carlo**. 2013. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- LEÓN, F. P. **Evaluation of honed cylinder bores**. Annals of the CIRP. v. 51/1, 2002.
- LOBO, L. J. **Estudo comparativo do comportamento entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG30**. 2015. 123 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- LYSENKO, N. V. **Better geometric accuracy of shape of blind holes during honing**
- MACHADO, G. A. A. **Brunimento a Platô Aplicado a Cilindros de Motores: Avaliação da Evolução da Topografia da Superfície após Ciclos de Funcionamento em Banco de Provas**. 2008. 148 f. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte.
- MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. **Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science**. 2. Ed. John Wiley & Sons, New York. 2003. 760p.
- MILLER, M. L. **Flexible Honing. A study of cylinder wall microstructure. Proceedings Understanding. The Basics of Honing**, SME - Society of Mechanical Engineers, 1993. 9p.
- MILONE, Giuseppe. **Estatística geral e aplicada**. São Paulo: Centage Learning, 2009.
- MOCELLIN, F. **Desenvolvimento De Tecnologia Para Brunimento De Cilindros De Blocos De Motores Em Ferro Fundido Vermicular**. 2007 Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MONTGOMERY, D.C. - **Introduction to Statistical Quality Control**, 4th edition, John Wiley and Sons. 2001
- MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda.: Rio de Janeiro. 2004. 513 p.
- NAGEL. **Diamant-honschäfte**. Publicação técnica. Nurtingen, n. 1.14d, 1997a. 6p.
- NAGEL. **Diamond and CBN cutting ledges and cutting layers for honing**. Publicação técnica. Nurtingen, n. 1.04e, [ca. 1990]. 6p.

- NAGEL. **Diamonds and CBN tools for high requirements.** Publicação técnica. Nurtingen, ca. 2003.
- NAGEL. **Elements of honing.** Publicação técnica. Nurtingen, n. 1.15e, 1998b. 6p.
- NAGEL. **Honen von Kolbenbohrungen in Zylinder-kurbelgehäusen.** Publicação Técnica. Nurtingen, n. 1.26d, [ca. 2000]. 12 p.
- NAGEL. **Honen von Kolbenbohrungen in Zylinder-kurbelgehäusen.** Publicação Técnica. Nurtingen, n. 1.26d, ca. 2000. 12 p.
- NAGEL. **Interesting news about diamond honing.** Publicação técnica. Nurtingen, n. 1.11e, 1998a. 4p.
- NAGEL. **Nagel-Meßautomatik.** Publicação técnica. Nurtingen, n. 04.75, 1975.
- NAGEL. **Precidor Tools.** Disponível em: [< www.nagel.com/en/honing-tools/precidor-tools >](http://www.nagel.com/en/honing-tools/precidor-tools)
Acesso em: 08 de outubro de 2017.
- NAGEL. **Superfinish-Steine.** Publicação técnica. Nurtingen, n. 3.03d, 1997b. 8p.
- NETO, B. de B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos - Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria.** 2^a Ed. Campinas, Sp. Editora da Unicamp, 2003.
- NOVASKI O.; RIOS M. **Fluidos de corte: Introdução teórica e vantagens da aplicação de fluidos sintéticos na usinagem de aços ligas.** In: II Colóquio em tecnologia de manufatura e gestão da produção do NMQ. Anais. Campinas, 2001.
- NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo. Brasil. 1994. 119p.
- operations.** Vestnik Mashinostroeniya. v. 61, n. 7, p. 42-45, 1980.
- PAWLUS, P. A Study of the Functional Properties of Honed Cylinders Surface During Running-in. **Wear,** v. 176, p. 247-254, 1994.
- PAWLUS, P. Change of Cylinder Surface Topography in the Initial Stage of Engine Life. **Wear,** v. 209, p. 69-83, 1997.
- PAWLUS, P.; CIESLAK T.; MATHIA T. The Study of Cylinder Liner Plateau Honing Process. **Journal of Materials Processing Technology,** v. 209, p. 6078-6086, nov. 2009.
- PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. **Por que otimização multivariada?** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.10, n.2, p.106-110, 2005.
- PEREIRA, L. C. **Influência das Condições de Usinagem do Brunitamento Flexível na Qualidade Geométrica de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos.** 2016. 145 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade superficial. Palestra.** 3 Seminário de metrologia. 2011.
- POON, C. Y.; BRUSHAN, B. **Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler.** Wear, v. 190, p.76-88, 1995.
- RECABARREN, R. A. P. **Influência do Óleo Lubrificante na Transferência de Calor em um Compressor Hermético Alternativo.** 2007. 134 f. Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- REJOWSKI, E. D. **Caracterização e Desempenho de um Filme de Carbono Amorfo Hidrogenado Tipo Diamante (a-C:H) Dopado com Silício, Aplicado em Camisa de Cilindro De Motor à Combustão Interna.** 2012. 166 f. Dissertação de Mestrado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- ROMI. **Centros de Usinagem Verticais**, Disponível em <http://romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/Catalagos/Portugueses/cat_discovery_po_ai.pdf> Acesso em 18 dez. 2016.
- ROSA, V. A. O. **Investigação da Operação de Alargamento dos Furos Usinados em Pistões de Ferro-Carbono Sinterizado.** 2012. 122 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte.** 1999. 168 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 1999.
- SALJÉ, E.; VON SEE, M. Process-Optimization in Honing. **CIRP Annals. Manufacturing Technology**, v. 36, p. 235-239, 1987.
- SCHULER, G. M. B. H. **Metal Forming Handbook** /Schuler. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
- SHAIKH, J. H.; JAIN, N. K. Modeling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 200-209, fev. 2014.
- SMITH, A. M.; CHAPMAN, C. E.; DESLANDES, M.; LANGLAIS, J. S.; THIBODEAU, M. P. **Role of friction and tangential forces in the subjective scaling of tactile roughness.** ExpBrain Res 144. 2002. p. 211-223.
- SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS Tools and **Manufacturing Engineer Handbook: Materials, Finishing and Coating.** 4. ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983. v3
- SOTOMAYOR, P. O. **Caracterização e simulação de compressores alternativos utilizando fluidos com baixo potencial de aquecimento global.** 2013. 84 p. Tese de doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- SOUZA, A. J. “**Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica**”, Apostila Fundamentos de Usinagem II, 2007. p.1.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis, Editora da UFSC. 1993. 326p.
- STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 371 p.
- STOUT, K.; SULIIVAN P, DONG W.; et al. **The development of methods for the characterization of roughness in three dimensions**. Penton Press, London, 1993.
- TAYLOR HOBSON. **Guide to Surface Texture Parameters**. 2000.
- TAYLOR HOBSON. **Surface Finish Metrology**. 2003. 329 slides.
- VALLE, P. D. **Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto**. 2001. 129 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- VERTEC. **Manual Flex-Hone**, Disponível em: <www.vertec.com.br/produtos/flex_hone.pdf> Acesso em: 02 de maio de 2017
- VISQUE, E. J. **Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Brunimento**. 1998. 77 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.
- VRAC, D.; SIDJANIN, L.; BALOS, S. The effect of honing speed and grain size on surface roughness and material removal rate during honing. **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 11, p. 106-108, 1990.
- WEIGMANN, Uwe-Peter. **Grundlagen und Anwendungen des Honens**. In: 2. NURTINGER HONSYMPORIUM. Anais... Nagel: 2005. Nurtingen, 2005b.
- YAMAMOTO, A.; MATSUMORI, N.; UEDA, T. **Cutting characteristics of splintery grains and its utilization: investigation by honing**. Bull. Japan Society of Precision Engineering. v. 11, n. 2, 1977.
- YOKOHAMA, K.; ICHIMIYA, R. **Analyses of thermal deformation of workpieces in honing process** (3rd Report): Numerical analyses of cylindrical and noncylindrical workpieces. Bull. Japan Society of Precision Engineering. v. 18, n. 1, p. 15-20, 1984.
- YUSSEFIAN N. Z.; KOSHY P. “**Application of foil electrodes for electro-erosion edge honing of complex-shaped carbide inserts**,” J. Mater. Process. Technol., vol. 213, no. 3, pp. 434–443, 2013.

APÊNDICE I - DESVIO ARITMÉTICO MÉDIO DO PERFIL (R_a)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro R_a para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

R_a		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	0,23	0,01	0,03	0,13	0,00	0,03
	27	0,19	0,01	0,03	0,14	0,01	0,03
	28	0,21	0,01	0,03	0,15	0,01	0,03
	29	0,17	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	30	0,19	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
2	1	0,24	0,01	0,03	0,17	0,01	0,03
	2	0,24	0,02	0,03	0,16	0,01	0,03
	3	0,21	0,01	0,03	0,16	0,01	0,03
	4	0,22	0,00	0,03	0,16	0,00	0,03
	5	0,24	0,01	0,03	0,17	0,01	0,03
3	21	0,20	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	22	0,17	0,02	0,03	0,10	0,01	0,03
	23	0,22	0,02	0,03	0,14	0,01	0,03
	24	0,19	0,02	0,03	0,10	0,01	0,03
	25	0,18	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
4	6	0,21	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
	7	0,21	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	8	0,24	0,02	0,03	0,13	0,00	0,03
	9	0,19	0,02	0,03	0,13	0,01	0,03
	10	0,27	0,00	0,03	0,14	0,01	0,03
5	16	0,16	0,01	0,03	0,10	0,00	0,03
	17	0,21	0,01	0,03	0,12	0,00	0,03
	18	0,22	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	19	0,19	0,01	0,03	0,12	0,01	0,03
	20	0,19	0,02	0,03	0,12	0,02	0,03
6	11	0,20	0,01	0,03	0,09	0,01	0,03
	12	0,22	0,02	0,03	0,10	0,01	0,03
	13	0,24	0,01	0,03	0,12	0,01	0,03
	14	0,23	0,02	0,03	0,11	0,01	0,03
	15	0,20	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03

APÊNDICE II - DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO DO PERFIL (Rq)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rq para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

Rq		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	0,30	0,02	0,03	0,17	0,01	0,03
	27	0,27	0,02	0,03	0,19	0,02	0,03
	28	0,31	0,02	0,03	0,21	0,03	0,04
	29	0,23	0,01	0,03	0,17	0,01	0,03
	30	0,25	0,01	0,03	0,17	0,01	0,03
2	1	0,31	0,01	0,03	0,24	0,02	0,03
	2	0,32	0,03	0,04	0,23	0,01	0,03
	3	0,29	0,02	0,03	0,23	0,03	0,04
	4	0,28	0,00	0,03	0,22	0,00	0,03
	5	0,37	0,03	0,04	0,26	0,03	0,04
3	21	0,27	0,01	0,03	0,19	0,02	0,03
	22	0,24	0,01	0,03	0,14	0,02	0,03
	23	0,32	0,04	0,05	0,24	0,02	0,03
	24	0,25	0,03	0,04	0,16	0,03	0,04
	25	0,23	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
4	6	0,28	0,02	0,04	0,14	0,01	0,03
	7	0,28	0,01	0,03	0,15	0,02	0,04
	8	0,33	0,02	0,04	0,22	0,01	0,03
	9	0,26	0,03	0,04	0,20	0,04	0,05
	10	0,37	0,01	0,03	0,21	0,01	0,03
5	16	0,21	0,01	0,03	0,14	0,01	0,03
	17	0,30	0,03	0,04	0,18	0,01	0,03
	18	0,29	0,02	0,03	0,17	0,02	0,03
	19	0,26	0,02	0,03	0,18	0,03	0,04
	20	0,25	0,02	0,04	0,16	0,02	0,04
6	11	0,26	0,03	0,04	0,14	0,02	0,03
	12	0,29	0,03	0,05	0,15	0,02	0,03
	13	0,32	0,03	0,04	0,19	0,02	0,03
	14	0,31	0,03	0,04	0,17	0,02	0,03
	15	0,26	0,01	0,03	0,16	0,03	0,03

APÊNDICE III - ALTURA MÁXIMA DO PICO DO PERFIL (R_p)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro R_p para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

R_p		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	1,01	0,06	0,08	0,47	0,02	0,03
	27	0,74	0,04	0,05	0,47	0,07	0,09
	28	0,70	0,09	0,11	0,52	0,04	0,05
	29	0,78	0,13	0,17	0,52	0,04	0,05
	30	0,69	0,03	0,04	0,50	0,05	0,06
2	1	0,78	0,08	0,09	0,50	0,12	0,15
	2	1,07	0,05	0,06	0,41	0,05	0,06
	3	0,80	0,16	0,20	0,47	0,04	0,06
	4	0,84	0,05	0,06	0,34	0,02	0,03
	5	0,84	0,14	0,17	0,46	0,02	0,03
3	21	0,82	0,09	0,11	0,38	0,03	0,04
	22	0,70	0,06	0,08	0,39	0,04	0,06
	23	0,87	0,14	0,17	0,43	0,04	0,05
	24	0,84	0,11	0,14	0,39	0,09	0,11
	25	0,61	0,06	0,09	0,32	0,02	0,03
4	6	1,16	0,23	0,29	0,26	0,04	0,06
	7	0,94	0,07	0,09	0,28	0,03	0,04
	8	0,83	0,16	0,20	0,31	0,04	0,05
	9	0,79	0,12	0,15	0,28	0,03	0,04
	10	1,05	0,11	0,14	0,39	0,02	0,03
5	16	0,65	0,02	0,10	0,36	0,12	0,15
	17	0,73	0,16	0,21	0,37	0,05	0,07
	18	0,92	0,13	0,17	0,32	0,04	0,05
	19	0,68	0,07	0,08	0,38	0,10	0,13
	20	0,76	0,08	0,10	0,38	0,07	0,09
6	11	0,83	0,08	0,10	0,28	0,05	0,06
	12	0,83	0,17	0,22	0,25	0,05	0,06
	13	0,95	0,18	0,23	0,28	0,06	0,07
	14	0,87	0,11	0,14	0,27	0,04	0,05
	15	0,84	0,11	0,14	0,26	0,03	0,04

APÊNDICE IV - PROFUNDIDADE MÁXIMA DO VALE DO PERFIL (Rv)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rv para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

Rv		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	1,26	0,35	0,44	1,08	0,12	0,15
	27	1,36	0,19	0,24	1,03	0,25	0,31
	28	1,76	0,14	0,18	1,10	0,22	0,28
	29	0,90	0,07	0,08	0,85	0,19	0,24
	30	1,03	0,14	0,18	0,84	0,22	0,28
2	1	1,36	0,07	0,09	1,20	0,16	0,21
	2	1,23	0,18	0,22	1,31	0,19	0,23
	3	1,53	0,29	0,37	1,43	0,33	0,41
	4	1,13	0,20	0,25	0,76	0,12	0,15
	5	2,23	0,44	0,56	1,54	0,35	0,44
3	21	1,35	0,22	0,28	1,17	0,20	0,25
	22	1,15	0,29	0,37	0,64	0,15	0,19
	23	1,78	0,41	0,52	1,86	0,14	0,18
	24	0,91	0,20	0,25	1,04	0,41	0,51
	25	0,78	0,08	0,10	0,54	0,14	0,18
4	6	0,79	0,06	0,07	0,68	0,07	0,09
	7	0,99	0,11	0,14	0,80	0,23	0,27
	8	1,63	0,32	0,40	1,61	0,18	0,23
	9	1,09	0,20	0,25	1,26	0,42	0,53
	10	1,50	0,12	0,16	0,99	0,04	0,06
5	16	0,81	0,13	0,17	0,66	0,07	0,09
	17	1,81	0,35	0,43	1,24	0,14	0,17
	18	1,20	0,20	0,26	0,90	0,18	0,23
	19	1,15	0,37	0,47	1,37	0,40	0,50
	20	1,11	0,30	0,37	0,79	0,38	0,48
6	11	1,04	0,49	0,62	0,96	0,17	0,21
	12	1,22	0,40	0,50	0,91	0,10	0,13
	13	1,37	0,35	0,44	1,27	0,14	0,17
	14	1,35	0,17	0,22	1,28	0,10	0,13
	15	1,04	0,22	0,28	1,04	0,41	0,52

APÊNDICE V - ALTURA TOTAL DO PERFIL (Rt)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rt para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

Rt		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	3,22	0,68	0,53	2,70	0,59	0,74
	27	3,55	0,32	0,40	3,53	0,51	0,64
	28	4,32	0,34	0,42	3,34	0,55	0,69
	29	2,16	0,30	0,37	2,09	0,21	0,27
	30	2,42	0,43	0,53	1,95	0,56	0,71
2	1	2,65	0,09	0,11	2,19	0,27	0,34
	2	2,75	0,22	0,28	2,06	0,22	0,27
	3	3,85	0,49	0,61	2,86	0,19	0,24
	4	2,57	0,30	0,38	1,35	0,09	0,65
	5	4,39	0,48	0,60	4,61	0,58	0,72
3	21	2,83	0,36	0,45	2,51	0,11	0,14
	22	2,71	0,66	0,82	1,55	0,53	0,66
	23	4,21	0,41	0,52	3,21	0,25	0,32
	24	2,34	0,43	0,53	2,45	0,78	0,97
	25	2,07	0,42	0,50	1,80	0,95	1,19
4	6	2,52	0,39	0,48	1,19	0,09	0,11
	7	2,35	0,25	0,31	1,46	0,54	0,68
	8	3,32	0,50	0,62	3,19	0,60	0,76
	9	3,25	0,80	0,99	2,98	0,77	0,96
	10	3,49	0,56	0,69	2,27	0,17	0,22
5	16	2,56	0,44	0,52	1,83	0,76	0,94
	17	4,20	0,58	0,72	2,77	0,51	0,64
	18	3,32	0,43	0,51	1,86	0,34	0,43
	19	3,73	0,81	1,02	2,75	0,82	1,02
	20	2,84	0,50	0,63	2,46	1,00	1,25
6	11	2,68	0,95	1,17	2,10	0,15	0,19
	12	2,99	1,08	1,34	2,00	0,38	0,47
	13	3,34	0,86	1,07	2,21	0,23	0,29
	14	2,85	0,19	0,24	2,25	0,46	0,57
	15	3,63	0,43	0,52	2,24	0,39	0,48

**APÊNDICE VI - FRAÇÃO DE CONTATO MÍNIMO NO NÚCLEO DO PERFIL
DE RUGOSIDADE (*MrI*)**

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro *MrI* para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

<i>MrI</i>		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	<i>x</i> (%)	<i>s</i> (%)	<i>U</i> (%)	<i>x</i> (%)	<i>s</i> (%)	<i>U</i> (%)
1	26	12,3	1,5	1,9	8,9	2,2	2,7
	27	10,7	1,8	2,3	11,6	1,4	1,8
	28	11,0	1,5	1,9	9,7	1,7	2,2
	29	13,2	3,0	3,8	13,6	1,8	2,3
	30	10,8	2,9	3,6	10,7	1,8	2,3
2	1	9,4	0,9	1,2	8,0	1,2	1,6
	2	11,3	1,6	2,0	10,6	3,3	4,1
	3	10,2	2,8	3,5	9,4	3,4	4,2
	4	11,3	1,1	1,4	8,4	2,6	2,0
	5	13,5	3,8	4,7	10,8	2,6	3,2
3	21	12,4	2,4	3,0	9,5	4,0	5,0
	22	10,3	1,8	2,3	9,9	2,3	2,9
	23	11,6	1,5	1,9	9,9	2,3	2,9
	24	11,6	1,5	1,9	12,8	4,0	5,0
	25	10,7	1,8	2,3	9,9	1,5	1,9
4	6	11,7	1,8	2,2	15,2	6,8	8,4
	7	11,5	1,9	2,3	8,5	2,9	3,7
	8	10,1	1,2	1,5	11,2	6,0	7,5
	9	10,4	1,7	2,1	8,0	2,2	2,7
	10	10,4	1,7	2,1	9,3	2,4	3,0
5	16	11,0	1,0	1,3	8,7	1,5	1,9
	17	10,5	2,2	2,8	10,5	2,1	2,6
	18	10,9	1,5	2,0	18,4	7,9	9,8
	19	10,7	1,8	2,3	11,4	4,7	5,9
	20	11,5	1,9	2,4	10,1	5,7	7,1
6	11	10,8	2,7	3,4	11,9	2,9	3,7
	12	11,9	2,8	3,5	9,8	1,4	1,8
	13	11,5	2,2	2,7	8,0	3,6	4,6
	14	11,4	0,6	0,8	9,1	2,5	3,1
	15	10,4	0,8	1,1	11,8	5,0	6,2

**APÊNDICE VII - FRAÇÃO DE CONTATO MÁXIMO NO NÚCLEO DO
PERFIL DE RUGOSIDADE (*Mr2*)**

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro *Mr2* para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

<i>Mr2</i>		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	<i>x</i> (%)	<i>s</i> (%)	<i>U</i> (%)	<i>x</i> (%)	<i>s</i> (%)	<i>U</i> (%)
1	26	88,3	1,3	1,9	85,2	1,4	2,0
	27	87,5	1,1	1,8	86,3	2,8	3,3
	28	87,3	1,1	1,8	85,1	2,3	2,8
	29	87,2	1,9	2,4	84,1	2,4	2,9
	30	86,4	0,9	1,7	87,7	1,2	1,9
2	1	86,1	1,6	2,1	83,5	3,1	3,8
	2	87,6	1,3	1,9	84,2	3,6	4,3
	3	87,6	0,9	1,7	83,2	2,6	3,2
	4	87,0	1,6	2,1	80,4	2,4	2,9
	5	85,4	2,3	2,9	83,1	3,6	4,4
3	21	86,9	1,8	2,3	86,6	1,2	1,8
	22	86,2	1,2	1,8	84,8	1,7	2,3
	23	87,0	0,8	1,6	86,1	1,9	2,4
	24	88,2	2,3	2,8	85,8	1,6	2,1
	25	88,4	1,7	2,3	85,6	2,3	2,8
4	6	89,0	1,7	2,3	74,3	11,0	13,7
	7	88,1	1,8	2,4	84,9	1,4	1,9
	8	86,0	0,8	1,6	81,1	2,6	2,4
	9	87,9	2,5	3,1	82,3	2,3	2,8
	10	83,9	1,5	2,1	83,7	1,7	2,2
5	16	88,0	1,9	2,5	84,3	1,8	2,4
	17	86,1	0,8	1,6	84,4	2,1	2,6
	18	86,9	1,6	2,2	80,4	6,9	8,5
	19	86,0	1,2	1,8	83,4	6,0	7,4
	20	85,8	2,0	2,5	84,7	3,4	4,1
6	11	86,7	1,8	2,3	79,0	5,1	6,3
	12	86,6	1,7	2,2	78,8	6,1	7,5
	13	87,1	0,8	1,6	84,7	1,3	2,1
	14	86,9	2,0	2,6	79,4	1,8	2,2
	15	87,1	1,1	1,7	84,6	3,5	4,2

APÊNDICE VIII - RUGOSIDADE DO NÚCLEO DO PERFIL (Rk)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rk para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

Rk		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	0,68	0,04	0,05	0,42	0,02	0,03
	27	0,52	0,01	0,03	0,41	0,02	0,03
	28	0,53	0,03	0,04	0,40	0,02	0,03
	29	0,51	0,04	0,05	0,34	0,03	0,04
	30	0,62	0,10	0,13	0,44	0,05	0,07
2	1	0,73	0,05	0,07	0,49	0,03	0,04
	2	0,74	0,08	0,10	0,41	0,05	0,07
	3	0,59	0,04	0,05	0,40	0,06	0,08
	4	0,63	0,03	0,04	0,35	0,05	0,04
	5	0,60	0,04	0,05	0,46	0,06	0,08
3	21	0,56	0,02	0,03	0,38	0,04	0,05
	22	0,48	0,05	0,07	0,31	0,02	0,03
	23	0,59	0,05	0,07	0,36	0,03	0,04
	24	0,57	0,05	0,07	0,28	0,02	0,03
	25	0,54	0,04	0,05	0,31	0,03	0,04
4	6	0,62	0,05	0,07	0,17	0,08	0,10
	7	0,66	0,04	0,05	0,30	0,02	0,03
	8	0,63	0,02	0,03	0,26	0,05	0,07
	9	0,60	0,10	0,13	0,32	0,02	0,03
	10	0,76	0,05	0,07	0,41	0,05	0,07
5	16	0,47	0,03	0,04	0,35	0,03	0,04
	17	0,57	0,02	0,03	0,31	0,03	0,04
	18	0,63	0,05	0,07	0,25	0,07	0,09
	19	0,59	0,05	0,07	0,32	0,04	0,05
	20	0,56	0,05	0,07	0,33	0,05	0,07
6	11	0,58	0,03	0,04	0,24	0,07	0,09
	12	0,62	0,05	0,07	0,23	0,05	0,07
	13	0,72	0,03	0,04	0,27	0,02	0,03
	14	0,69	0,04	0,05	0,26	0,02	0,03
	15	0,65	0,04	0,05	0,26	0,03	0,04

APÊNDICE IX - REGIÃO DE PICO (Rpk)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rpk para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

Rpk		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	0,35	0,04	0,05	0,15	0,03	0,04
	27	0,24	0,04	0,05	0,17	0,02	0,03
	28	0,25	0,01	0,03	0,16	0,01	0,03
	29	0,27	0,07	0,09	0,17	0,02	0,03
	30	0,24	0,05	0,07	0,17	0,03	0,04
2	1	0,23	0,04	0,05	0,16	0,05	0,07
	2	0,37	0,05	0,07	0,15	0,02	0,03
	3	0,27	0,05	0,07	0,13	0,04	0,05
	4	0,29	0,02	0,03	0,13	0,03	0,04
	5	0,29	0,04	0,05	0,20	0,02	0,03
3	21	0,29	0,05	0,07	0,18	0,08	0,10
	22	0,26	0,04	0,05	0,11	0,02	0,03
	23	0,26	0,03	0,04	0,12	0,02	0,03
	24	0,28	0,03	0,04	0,15	0,03	0,04
	25	0,21	0,03	0,04	0,14	0,04	0,05
4	6	0,41	0,08	0,10	0,15	0,03	0,04
	7	0,30	0,05	0,07	0,11	0,02	0,03
	8	0,31	0,10	0,13	0,12	0,02	0,03
	9	0,39	0,09	0,12	0,10	0,01	0,03
	10	0,41	0,08	0,10	0,15	0,03	0,04
5	16	0,21	0,02	0,03	0,15	0,03	0,04
	17	0,23	0,03	0,04	0,12	0,02	0,03
	18	0,28	0,03	0,04	0,16	0,05	0,07
	19	0,22	0,02	0,03	0,14	0,06	0,08
	20	0,24	0,03	0,04	0,20	0,16	0,20
6	11	0,34	0,08	0,10	0,08	0,03	0,09
	12	0,27	0,05	0,07	0,11	0,03	0,04
	13	0,36	0,05	0,07	0,07	0,03	0,04
	14	0,31	0,08	0,10	0,10	0,03	0,04
	15	0,31	0,05	0,07	0,11	0,02	0,03

APÊNDICE X - REGIÃO DE VALE (Rvk)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao parâmetro Rvk para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

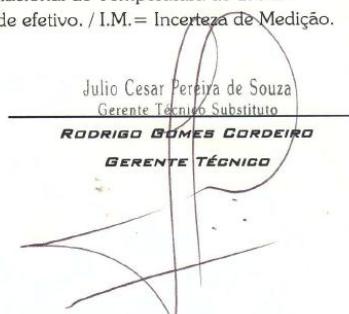
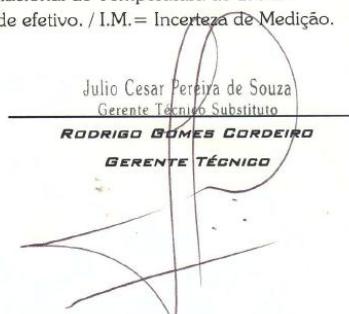
Rvk		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	x (μm)	s (μm)	U (μm)	x (μm)	s (μm)	U (μm)
1	26	0,36	0,07	0,09	0,35	0,03	0,04
	27	0,32	0,06	0,08	0,63	0,19	0,23
	28	0,40	0,07	0,09	0,55	0,18	0,23
	29	0,27	0,03	0,04	0,25	0,03	0,04
	30	0,36	0,03	0,04	0,32	0,10	0,13
2	1	0,44	0,05	0,07	0,45	0,09	0,12
	2	0,45	0,06	0,09	0,47	0,09	0,12
	3	0,39	0,08	0,10	0,42	0,13	0,17
	4	0,38	0,06	0,08	0,27	0,03	0,17
	5	0,78	0,17	0,21	0,69	0,11	0,14
3	21	0,42	0,02	0,03	0,49	0,16	0,20
	22	0,35	0,05	0,07	0,18	0,02	0,03
	23	0,31	0,04	0,05	0,53	0,13	0,17
	24	0,36	0,13	0,17	0,33	0,14	0,18
	25	0,24	0,03	0,04	0,30	0,17	0,21
4	6	0,29	0,03	0,04	0,31	0,05	0,07
	7	0,33	0,04	0,05	0,29	0,10	0,13
	8	0,61	0,13	0,17	0,53	0,09	0,12
	9	0,30	0,07	0,09	0,40	0,11	0,14
	10	0,57	0,10	0,13	0,52	0,07	0,09
5	16	0,32	0,07	0,09	0,25	0,10	0,13
	17	0,65	0,22	0,28	0,49	0,10	0,13
	18	0,46	0,05	0,07	0,34	0,08	0,10
	19	0,58	0,19	0,23	0,35	0,08	0,10
	20	0,49	0,14	0,18	0,39	0,19	0,23
6	11	0,33	0,10	0,13	0,41	0,08	0,10
	12	0,43	0,12	0,16	0,32	0,05	0,07
	13	0,42	0,11	0,14	0,47	0,13	0,17
	14	0,48	0,09	0,12	0,29	0,07	0,09
	15	0,39	0,06	0,08	0,36	0,07	0,09

APÊNDICE XI - COEFICIENTE DE VAZIO (CV)

Valor médio, desvio-padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95 %) associada ao coeficiente de vazio R_p/R_t para todos os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas 6 condições de corte investigadas.

<i>CV</i>		BC			BC+BF		
Experimento	Bloco	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>U</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>U</i>
1	26	0,33	0,07	0,10	0,18	0,03	0,06
	27	0,21	0,02	0,04	0,13	0,01	0,04
	28	0,16	0,01	0,03	0,16	0,02	0,04
	29	0,36	0,02	0,09	0,25	0,04	0,06
	30	0,29	0,05	0,08	0,27	0,06	0,11
2	1	0,29	0,04	0,05	0,23	0,04	0,08
	2	0,39	0,02	0,05	0,20	0,04	0,06
	3	0,21	0,04	0,07	0,16	0,02	0,03
	4	0,33	0,03	0,06	0,25	0,03	0,05
	5	0,19	0,02	0,05	0,10	0,01	0,02
3	21	0,29	0,03	0,06	0,15	0,01	0,02
	22	0,27	0,07	0,10	0,27	0,06	0,13
	23	0,21	0,02	0,05	0,14	0,02	0,03
	24	0,37	0,05	0,10	0,18	0,09	0,12
	25	0,31	0,08	0,11	0,22	0,10	0,12
4	6	0,46	0,04	0,13	0,22	0,03	0,15
	7	0,40	0,05	0,07	0,21	0,05	0,10
	8	0,25	0,06	0,09	0,10	0,02	0,03
	9	0,26	0,08	0,11	0,10	0,04	0,06
	10	0,31	0,03	0,07	0,17	0,02	0,03
5	16	0,26	0,06	0,08	0,21	0,08	0,13
	17	0,17	0,03	0,06	0,14	0,04	0,06
	18	0,28	0,04	0,07	0,18	0,04	0,06
	19	0,19	0,05	0,07	0,15	0,05	0,08
	20	0,29	0,09	0,11	0,18	0,07	0,10
6	11	0,33	0,07	0,14	0,13	0,02	0,04
	12	0,30	0,08	0,14	0,13	0,05	0,06
	13	0,29	0,05	0,11	0,13	0,03	0,05
	14	0,31	0,05	0,07	0,13	0,04	0,05
	15	0,23	0,04	0,06	0,12	0,02	0,03

ANEXO I - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL

	<p><i>Certificado de Calibração</i></p> <p><i>Laboratório de Temperatura & Umidade</i></p> <p><i>Número do Certificado R4996/13 Folha 1/2</i></p>	
<p>CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU</p> <p>ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG</p> <p>INTERESSADO : O mesmo</p> <p>ENDEREÇO : O mesmo</p> <p>INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital</p> <p>FABRICANTE : Instrutherm</p> <p>MODELO : HT-260</p> <p>IDENTIFICAÇÃO : Não especificado</p> <p>NÚMERO DE SÉRIE : 06120362</p> <p>DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório Elus</p> <p>PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente TEMPERATURA DO AR : 23°C ± 5°C</p> <p>DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 UMIDADE RELATIVA AR : 45%UR a 70%UR</p> <p>PADRÕES UTILIZADOS : Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.</p> <p>PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO : - A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.</p> <p>OBSERVAÇÕES : - Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. - A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto. - Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990. - k= fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / Veff= graus de liberdade efetivo. / I.M.= Incerteza de Medição.</p> <p>TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA</p>		
 <p style="margin-top: 10px;">Julio Cesar Pereira de Souza Gerente Técnico Substituto</p> <p style="margin-top: 10px;">RODRIGO GOMES CORDEIRO GERENTE TÉCNICO</p> 		

A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**ANEXO I (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL**



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

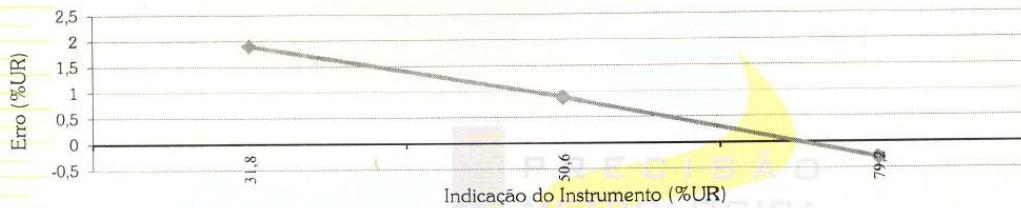
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado
Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado
Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞



A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

ANEXO II - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

 LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2016		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: LEPU
 Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121
 Telefone: (34) 3239-4584
 E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

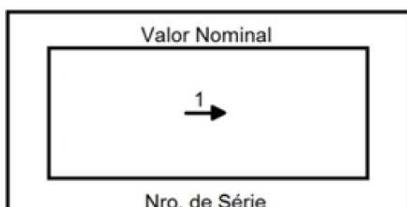
Instrumento: Rugosímetro
 Tipo: portátil
 Fabricante: Taylor Hobson
 Resolução: 0,01 µm
 Serial: 6317L
 Identificação: Patrimônio UFU N.º 14 12 90
 Última calibração: 2013

3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2016
 Data do pedido: 17/03/2016
 Data da calibração: 17/03/2016

4. Procedimento

Inicialmente foi realizada a análise visual tanto do instrumento quanto do padrão de rugosidade e não foi notada nenhuma anomalia. O rugosímetro funciona de forma adequada e o padrão se encontra em bom estado de conservação, sem a presença de risco e defeitos aparentes.
 O padrão de rugosidade possui Ra igual a 0,38 µm e foi adotada uma posição central para a realização das medições. Foram efetuadas dez medições.
 A posição de medição pode ser observada na figura abaixo.



Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.
Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

ANEXO II (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

 LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2016		

Condições de Medição:

Ra (0,38 µm)

Cut-off (lr) = 0,08 mm

Comprimento de avaliação (ln) = 0,4 mm

5. Condições ambientais

Temperatura: (20 ±1) °C

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade

Fabricante: Mitutoyo

Código: 178-604

Número de série: 001031008

Valor nominal: Ra (0,38 µm)

Número do Certificado de Calibração: 15218/11

Incerteza expandida: 6% para k = 2,65 e 95% de abrangência

Tipo: Termo-higrômetro Digital

Fabricante: Instrutherm

Modelo: HT-260

Número de série: 06120362

Número do Certificado de Calibração: 06994/13

Incerteza expandida: 2,9 µm para k = 2,25 e 95% de abrangência

7. Resultados da calibração

Posição 1	Ra (0,38 µm)										Média (µm)	Desvio Padrão (µm)			
	Leituras (µm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,005		

Nota: Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio padrão.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.
Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

**ANEXO II (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
RUGOSÍMETRO**

 LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 17/03/2016	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2016		

8. Incerteza da calibração

Ra (0,38 µm)		
Posição 1	U (µm)	k
	0,03	2,45

A incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão combinada de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t corresponde a um nível de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (BIPM et al., 2008).

Data da Emissão: Uberlândia, (17) de (março) de (2016).



Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

Leandro Carvalho Pereira
Operador

*Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.
Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584*