

LEANDRO CARVALHO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM DO
BRUNIMENTO FLEXÍVEL NA RUGOSIDADE DE
CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES
HERMÉTICOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

LEANDRO CARVALHO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM DO BRUNIMENTO
FLEXÍVEL NA RUGOSIDADE DE CILINDROS DE BLOCOS DE
COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para 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
2016

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

- P436i Pereira, Leandro Carvalho, 1988-
2016 Influência das condições de usinagem do brunitimento flexível na
rugosidade de cilindros de blocos de compressores herméticos / Leandro
Carvalho Pereira. - 2016.
147 f. : il.
- Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.
Coorientador: Luciano José Arantes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3. Aspereza
de superfície - Teses. 4. Medição - Confiabilidade - Teses. I. Valdés
Arencibia, Rosenda. II. Arantes, Luciano José, 1974- III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente, ao apoio e a ajuda de todos, a concretizar o meu sonho de me tornar mestre e 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 CAPES, pelo apoio financeiro.

À EMBRACO S/A (Whirlpool - Unidade Compressores) pelo fornecimento do material, mas principalmente pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

À Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia e ao Prof. Dr. Luciano José Arantes pelos preciosos ensinamentos, paciência e disposição para que o trabalho fosse realizado com êxito.

Aos colegas de pesquisa Walter dos Santos Motta Neto e principalmente José Eduardo Leal e Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa, pela disposição e contribuição direta no trabalho desenvolvido.

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

À Dennise Basso de Santi, minha namorada, que tanto me incentivou e ajudou nos bons e maus momentos.

À minha querida família, por estar presente em todos os momentos da minha vida, principalmente: a minha querida mãe Soraya pelo amor incondicional e dedicação, a minha querida avó Iêda, que veio a falecer, pelo carinho e pelas orações, ao meu querido avô João Batista e a minha irmã Alessandra, por compartilharem os bons e maus momentos comigo.

Pereira, L. C. **Influência das Condições de Usinagem do Brunimento Flexível na Rugosidade de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos.** 2016. 145 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de um planejamento fatorial completo, o efeito das condições de usinagem (rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta) empregados durante o processo de brunimento flexível na rugosidade (R_a , R_q , R_p , R_v , R_t , CV , R_k , R_{pk} , R_{vk} , V_o , R_{sk} e R_{ku}) do cilindro de blocos de compressores herméticos. O brunimento convencional foi efetuado pela EMBRACO, enquanto que o brunimento flexível foi realizado na Universidade Federal de Uberlândia utilizando um centro de usinagem CNC e um brunidor flexível que é composto por uma haste metálica e cerdas de nylon com lóbulos abrasivos nas pontas. A medição da rugosidade foi efetuada por um rugosímetro eletromecânico. Para cada mensurando foi estimada sua respectiva incerteza de medição, aplicando o método proposto no GUM, exceto para os parâmetros R_{sk} e R_{ku} , que foi utilizado o método de Monte Carlo. Os resultados indicaram que o processo de brunimento flexível utilizando 3 golpes da ferramenta, rotação de 700 rpm e velocidade de avanço de 1400 mm/min proporcionou o melhor acabamento superficial considerando a funcionalidade dos cilindros. O brunimento flexível reduziu a altura dos picos e eliminou picos isolados sem alterar a profundidade dos vales, o que pode levar a melhorias nas propriedades de amaciamento da superfície, retenção de lubrificante, na resistência mecânica e na capacidade de suportar cargas em operações de contato.

Palavras Chave: Compressores herméticos. Brunimento convencional e flexível. Rugosidade. Incerteza de medição.

Pereira, L. C. **Influence of Flexible Honing Machining of Conditions in Roughness Hermetic Compressors Block Cylinders.** 2016. 145 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate, using a complete factorial design, the effect of machining conditions (speed, feed rate and tool strokes numbers) used during the flexible honing process in roughness (R_a , R_q , R_p , R_v , R_t , CV , R_k , R_{pk} , R_{vk} , V_o , R_{sk} e R_{ku}) of the hermetic compressors blocks cylinder. The conventional honing was done by EMBRACO, while the flexible honing was conducted at Federal University of Uberlândia using a CNC machining center and a flexible honing which consists of a metal rod and nylon bristles with abrasive lobes at the tips. The roughness measurement was conducted by an electromechanical rugosimeter. For each measuring was estimated its respective measurement uncertainty, using the method proposed in the GUM, except for R_{sk} and R_{ku} parameters that was used the Monte Carlo method. The results indicated that the flexible honing process using three strokes of the tool, speed 700 rpm and feed rate of 1400 mm/min provided the best surface finish considering the functionality of the cylinders. The flexible honing reduced height of the peaks and eliminated isolated peaks without changing the depth of the valleys, which can lead to improvements in softening properties of the surface, lubricant retention, mechanical strength and capacity to withstand loads in contact operations.

Keywords: *Hermetic compressors. Conventional and flexible honing. Roughness. Measurement uncertainty.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético (RECABARREN, 2007).....	7
Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético (HENKLEIN, 2006).....	8
Figura 2.3 - Brunidor do tipo precidor utilizado no brunimento de blocos de compressores herméticos (BRUNITEC, 2016).....	10
Figura 2.4 - Valores de rugosidade média (R_a) para algumas operações de usinagem (AARON, 1995).....	11
Figura 2.5 - Valores de rugosidade R_k , R_{pk} e R_{vk} para os diferentes processos de acabamento superficial em linha de produção (JOCSAK et al, 2005)	12
Figura 2.6 - (a) Direções de corte no brunimento e (b) superfície cruzada, gerada por este processo (AARON, 1995).....	13
Figura 2.7 - Mecanismo de formação de cavaco por abrasão - zonas de deformação elástica e plástica (KLOCKE, 2009)	14
Figura 2.8 - Aspecto ampliado por um microscópio eletrônico da direção de corte e do cavaco gerado na peça por um grão abrasivo (KLOCKE, 2009)	15
Figura 2.9 - Vetores velocidade de corte, tangencial e avanço (SABRI; MANSORI, 2009) ..	16
Figura 2.10 - Ferramenta brunidora flexível tipo esferas (BRM, 2015).....	19
Figura 2.11 - Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2008).....	19
Figura 2.12 - (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (VERTEC, 2008).....	20
Figura 2.13 - Desvios macrogeométricos e microgeométricos (TAYLOR HOBSON, com modificações, 2003).....	22
Figura 2.14 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994).....	23
Figura 2.15 - Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).....	24

Figura 2.16 - Altura máxima do pico do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002)	26
Figura 2.17 - Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002)	26
Figura 2.18 - Altura total do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002)	27
Figura 2.19 - Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).	28
Figura 2.20 - Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).	28
Figura 2.21 - Curva de <i>Abbott-Firestone</i> (TAYLOR HOBSON, 2000).	29
Figura 2.22 - (a) Distribuição retangular e (b) distribuição triangular (BIPM et al., 2008)....	33
Figura 2.23 - Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição utilizando o MC, conforme o JCGM 101 (BIPM et al., 2008)	36
Figura 3.1 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson.	46
Figura 3.2 - Padrão de rugosidade e rugosímetro posicionados no desempeno de granito para a realização da calibração do rugosímetro.	47
Figura 3.3 - Posição central adotada no padrão de rugosidade para a realização das medições	47
Figura 3.4 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson e bloco posicionados na mesa de desempeno da MMC.....	48
Figura 3.5 - Posições adotadas durante a medição da rugosidade do cilindro: (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3 e (d) Posição 4.....	49
Figura 3.6 - Desenho do bloco do compressor hermético (EMBRACO, 2016).....	50
Figura 3.7 - Interface gráfica do programa computacional <i>Talyprofile Gold 4.0</i>	50
Figura 3.8 - Centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2016).....	58
Figura 3.9 - Brunidor flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria 800 mesh	59
Figura 3.10 - Figura 3.10 - (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.	60
Figura 3.11 - Fixação do dispositivo na máquina CNC.	60

Figura 3.12 - Representação esquemática do número de golpes da ferramenta utilizados no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores.....	62
Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro Ra para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	66
Figura 4.2 - Valores médios do parâmetro Ra para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	68
Figura 4.3 - Valores médios do parâmetro Rq para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	70
Figura 4.4 - Valores médios do parâmetro Rq para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	72
Figura 4.5 - Valores médios do parâmetro Rp para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	74
Figura 4.6 - Perfis efetivos referente ao cilindro do bloco 13 para a medição 5 na posição 1 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento flexível.....	75
Figura 4.7 - Valores médios do parâmetro Rp para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	77
Figura 4.8 - Perfis efetivos referentes aos cilindros (a) do bloco 13 para a medição 5, (b) do bloco 30 para a medição 2 e (c) do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível ..	79
Figura 4.9 - Valores médios do parâmetro Rv para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	80
Figura 4.10 - Valores médios do parâmetro Rv para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	82
Figura 4.11 - Valores médios do parâmetro Rt para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	84
Figura 4.12 - Valores médios do parâmetro Rt para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	86

Figura 4.13 - Valores médios do coeficiente de vazio CV para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	88
Figura 4.14 - Valores médios do coeficiente de vazio Rp/Rt para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	90
Figura 4.15 - Curvas de <i>Abbott-Firestone</i> referente ao cilindro do bloco 13 para a medição 1 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento flexível.	92
Figura 4.16 - Curvas de <i>Abbott-Firestone</i> referentes aos cilindros (a) do bloco 13 para a medição 1 e (b) do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível.	94
Figura 4.17 - Valores médios do parâmetro Rk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	95
Figura 4.18 - Valores médios do parâmetro Rk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	97
Figura 4.19 - Valores médios do parâmetro Rpk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	99
Figura 4.20 - Valores médios do parâmetro Rpk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	101
Figura 4.21 - Valores médios do parâmetro Rvk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	103
Figura 4.22 - Valores médios do parâmetro Rvk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	105
Figura 4.23 - Valores médios do parâmetro Vo para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	107
Figura 4.24 - Valores médios do parâmetro Vo para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	108
Figura 4.25 - Valores médios do parâmetro Rsk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	110

Figura 4.26 - Histograma da função densidade de probabilidade do parâmetro de rugosidade Rsk referente ao cilindro do bloco 30 usinado pelo brunimento flexível.	111
Figura 4.27 - Valores médios do parâmetro Rsk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	112
Figura 4.28 - Valores médios do parâmetro Rku para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).	114
Figura 4.29 - Valores médios do parâmetro Rku para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Recomendação dos abrasivos em relação aos materiais a serem brunidos (VERTEC, 2008)	20
Tabela 2.2 - Comprimentos de amostragem em função e Ra para perfis não periódicos, segundo a ABNT NBR 4288 (ABNT, 2008).....	24
Tabela 2.3 - Quadro de ANOVA	42
Tabela 3.1 - Parâmetros de corte para brunimento convencional (FERNANDES, 2014)	45
Tabela 3.2 - Tipo de avaliação da incerteza (TI), 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 da calibração do rugosímetro	54
Tabela 3.3 - Tipo de avaliação da incerteza (TI), 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 Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rvk , Rpk , Rk e Vo	54
Tabela 3.4 - Tipo de avaliação da incerteza (TI), 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	55
Tabela 3.5 - Funções utilizadas para a simulação do MC (EXCEL, 2007).....	56
Tabela 3.6 - Especificações da ferramenta brunidora flexível (VERTEC, 2016)	58
Tabela 3.7 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo $2x2x3$	61
Tabela 4.1 - Valores das indicações, média aritmética e desvio-padrão obtidos durante a calibração do rugosímetro	63

Tabela 4.2 - Resultados da avaliação da incerteza do Ra obtido durante a calibração. Em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade	64
Tabela 4.3 - Resultados da avaliação da incerteza do Ra para o cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível.....	67
Tabela 4.4 - ANOVA do parâmetro Ra de rugosidade.....	68
Tabela 4.5 - Resultados da avaliação da incerteza do Rq para o cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível.....	71
Tabela 4.6 - ANOVA do parâmetro Rq de rugosidade.....	73
Tabela 4.7 - Resultados da avaliação da incerteza do Rp para o cilindro 13 usinado pelo brunimento flexível.....	76
Tabela 4.8 - ANOVA do parâmetro Rp de rugosidade.....	78
Tabela 4.9 - Resultados da avaliação da incerteza do Rv para o cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível.....	81
Tabela 4.10 - ANOVA do parâmetro Rv de rugosidade.....	83
Tabela 4.11 - Resultados da avaliação da incerteza do Rt para o cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível.....	85
Tabela 4.12 - ANOVA do parâmetro Rt de rugosidade	86
Tabela 4.13 - Resultados da avaliação da incerteza do coeficiente de vazio CV para o cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível	89
Tabela 4.14 - ANOVA do coeficiente de vazio CV	90
Tabela 4.15 - Resultados da avaliação da incerteza do Rk para o cilindro 5 usinado pelo brunimento flexível.....	96
Tabela 4.16 - ANOVA do parâmetro Rk de rugosidade.....	98
Tabela 4.17 - Resultados da avaliação da incerteza do Rpk para o cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível.....	100
Tabela 4.18 - ANOVA do parâmetro Rpk de rugosidade.....	102
Tabela 4.19 - Resultados da avaliação da incerteza do Rvk para o cilindro 33 usinado pelo brunimento flexível.....	104
Tabela 4.20 - ANOVA do parâmetro Rvk de rugosidade	106
Tabela 4.21 - ANOVA do parâmetro Vo de rugosidade.....	109
Tabela 4.22 - ANOVA do parâmetro Rsk de rugosidade	112
Tabela 4.23 - ANOVA do parâmetro Rku de rugosidade.....	116

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

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

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

A_r: Raio da ponta do apalpador

BC: Brunimento convencional

BF: Brunimento flexível

BIPM: Bureau International de Pesos e Medidas

CNC: Controle Numérico Computadorizado

CS: Coeficiente de sensibilidade

CV: Coeficiente de vazio

D: Deformação da peça durante a medição

d_c: diâmetro interno do cilindro

DP: Tipo de distribuição de probabilidades

EMBRACO: S/A *Whirlpool* - Unidade Compressores

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

FDP: Função densidade de probabilidade

F_n: Normal

F_t: Força tangencial

GL: Grau de liberdade

GUM: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição

H₀: Hipótese nula

H₁: 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

LMD: Laboratório de Metrologia Dimensional

ln: Comprimento de avaliação

lr: Comprimento de amostragem

lri: Percurso inicial

lrf: Percurso final

lt: Percurso de apalpamento

M: Número de iterações

MC: Monte Carlo

Mr1: Fração de contato mínimo

Mr2: Fração de contato máximo

n: Número de elementos da amostra

NG: Número de golpes da ferramenta

*n*_r: rotação do cabeçote brunidor

N: Número de variáveis de influência

p: Probabilidade

P: Valor médio do parâmetro avaliado

p(x_i): Função densidade de probabilidade

r: Posição do número

r(x_i, x_j): Grau de correlação entre *x_i* e *x_j*

Ra: Desvio aritmético médio do perfil avaliado

Rk: Rugosidade do núcleo do perfil

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

ROT: Rotação da ferramenta

Rp: Altura máxima do pico do perfil

Rpk: Região de pico

Rq: Desvio médio quadrático do perfil

RRug: Resolução do rugosímetro

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

Rt: Altura total do perfil

Rv: Profundidade máxima do vale do perfil

Rvk: Região de vale

Rz: Altura máxima do perfil

SiC: Carboneto de silício

s: Desvio-padrão experimental

- TI: Tipo de avaliação da incerteza
- $u(x)$: Incerteza padrão da variável x
- u_c : Incerteza padrão combinada
- U : Incerteza expandida
- UFU: Universidade Federal de Uberlândia
- V : Amplitude da vibração mecânica
- V_a : velocidade de avanço
- V_c : velocidade de corte
- V_t : velocidade tangencial
- VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia
- Vo : Volume de retenção de óleo
- \bar{x} : Média aritmética
- x_i : Estimativa da variável X_i
- \bar{x}_i : Média aritmética dos M valores atribuídos a x_i
- $\bar{x}(L_{cv})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro CV
- $\bar{x}(L_{Rku})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rku
- $\bar{x}(L_{Rsk})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rsk
- $\bar{x}(L_{Rug})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro
- y : Média aritmética dos M valores do mensurando obtidos durante a simulação de Monte Carlo
- \bar{y} : Estimativa do valor médio de Y
- $Z(x)$: Ordenadas dos pontos do perfil de rugosidade medidas a partir da linha média
- Z : Ordenada do ponto do perfil
- α : Ângulo de brunimento ou de cruzamento
- β : Metade do comprimento da base menor de um trapézio
- ΔA_R : Correção associada ao raio da ponta do apalpador
- ΔD_{PR} : correção associada à deformação do padrão de rugosidade durante a medição
- ΔD : Correção associada à deformação do material durante a medição
- ΔIC_{PR} : correção associada à incerteza da calibração do padrão de rugosidade
- ΔIC_{Rug} : Correção associada à incerteza padrão da calibração do rugosímetro
- ΔRq : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rq
- ΔRp : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rp
- ΔR_{Rug} : Correção associada à resolução do rugosímetro

ΔR_t : correção associada à incerteza da medição do parâmetro R_t

ΔT : Afastamento da temperatura com relação a 20°C

ΔZ : correção associada à incerteza da medição da ordenada Z

δT : Variação da temperatura durante a medição

μ : Média de uma distribuição normal

σ^2 : Variância populacional

$v_{efetivo}$: Grau de liberdade efetivo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Compressor recíproco alternativo hermético	6
2.1.1. <i>Princípio de funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético</i>	8
2.1.2. <i>Cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético</i>	9
2.2. Processos de usinagem por abrasão	10
2.2.1. <i>Brunimento</i>	11
2.2.2. <i>Mecanismo de formação do cavaco no brunimento</i>	14
2.2.3. <i>Cinemática do processo de brunimento</i>	15
2.2.4. <i>Tipos de grãos e ligantes utilizados no brunimento</i>	17
2.2.5. <i>Brunimento flexível</i>	18
2.3. Tolerâncias geométricas.....	21
2.3.1. <i>Rugosidade</i>	21
2.4. Incerteza de medição.....	31
2.4.1. <i>Avaliando a incerteza-padrão</i>	31
2.4.2. <i>Avaliação Tipo A da incerteza-padrão</i>	32
2.4.3. <i>Avaliação Tipo B da incerteza-padrão</i>	32
2.4.4. <i>Determinando a incerteza- padrão combinada</i>	33
2.4.5. <i>Determinando a incerteza expandida</i>	34
2.5. Estimativa da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo (MC)	35
2.5.1. <i>Avaliação do modelo</i>	37
2.5.2. <i>Representação discreta da distribuição da função para a variável de saída</i>	37
2.5.3. <i>Estimativa da variável de saída e da incerteza padrão associada</i>	37
2.5.4. <i>Intervalo de abrangência para a variável de saída</i>	38
2.6. Planejamento de experimentos	38

2.6.1. Princípios básicos do planejamento de experimentos	39
2.6.2. Roteiro para a realização de um bom experimento	39
2.6.3. Análise de variância.....	40
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	44
3.1. Brunimento convencional	45
3.2. Avaliação da rugosidade do cilindro	45
3.3. Avaliação da incerteza de medição	51
3.3.1. Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku}	55
3.3.1.1. Determinação do número de iterações para aplicação do MC.....	56
3.3.1.2. Geração de números aleatórios	56
3.3.1.3. Obtenção dos valores do mensurando	57
3.3.1.4. Obtenção da FDP do mensurando, o desvio padrão, os limites do intervalo de abrangência para um dado nível de confiança e a incerteza de medição	57
3.4. Brunimento flexível	57
3.4.1. Sistema de fixação e alinhamento do cilindro	59
3.5. Planejamento dos experimentos.....	61
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1. Resultados da calibração do rugosímetro eletromecânico	63
4.2. Rugosidade do cilindro	64
4.2.1. Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade do cilindro (R_a)	65
4.2.2. Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade (R_q).....	69
4.2.3. Altura máxima do pico do perfil de rugosidade (R_p)	73
4.2.4. Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade (R_v)	79
4.2.5. Altura total do perfil de rugosidade (R_t).....	83
4.2.6. Coeficiente de vazio (CV).....	87
4.2.7. Curva de Abbott-Firestone.....	91
4.2.8. Rugosidade do núcleo do perfil (R_k).....	94
4.2.9. Região de pico (R_{pk}).....	98
4.2.10. Região de vale (R_{vk})	102
4.2.11. Volume de retenção de óleo (V_o)	106
4.2.12. Fator de assimetria do perfil de rugosidade (R_{sk})	109

4.2.13. Fator de achatamento do perfil de rugosidade (Rku)	113
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	117
CAPÍTULO VI - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	120
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICES	127
APÊNDICE I - Certificado de Calibração do Rugosímetro	127
APÊNDICE II - Desvio Aritmético Médio do Perfil (Ra).....	130
APÊNDICE III - Desvio Médio Quadrático do Perfil (Rq).....	131
APÊNDICE IV - Altura Máxima do Pico do Perfil (Rp).....	132
APÊNDICE V - Profundidade Máxima do Vale do Perfil (Rv)	133
APÊNDICE VI - Altura Total do Perfil de Rugosidade (Rt).....	134
APÊNDICE VII - Coeficiente de Vazio (CV)	135
APÊNDICE VIII - Rugosidade do Núcleo do Perfil (Rk)	136
APÊNDICE IX - Região de Pico (Rpk)	137
APÊNDICE X - Região de Vale (Rvk)	138
APÊNDICE XI - Volume de Retenção de Óleo (Vo)	139
APÊNDICE XII - Fator de Assimetria do Perfil (Rsk)	140
APÊNDICE XIII - Fator de Achatamento do Perfil (Rku)	141
ANEXOS	142
ANEXO I - Certificado de Calibração do Termohigrômetro Digital	142
ANEXO II - Certificado de Calibração do Padrão de Rugosidade	144
ANEXO III - Certificado de Calibração do Desempeno de Granito	146

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A época contemporânea, caracterizada por grandes descobertas científicas, acelerado desenvolvimento tecnológico e uma economia cada vez mais globalizada, trouxe a evolução dos processos produtivos. O caráter global das relações comerciais, a competitividade e a busca por maiores parcelas no mercado levaram os países a investirem na procura de novas tecnologias, com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos. Como consequência, 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 (ROSA, 2012).

Em busca do desenvolvimento de seus produtos a indústria de refrigeração, particularmente o setor destinado à produção de compressores, procura constantemente investir para melhorar seus componentes. Desta forma, o cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético, tem recebido uma atenção especial por parte dos fabricantes e pesquisadores, pois requer elevada exatidão dimensional e geométrica, afim de evitar dificuldades na montagem, o aparecimento de esforços desgastantes, possíveis vazamentos e a perda de eficiência do compressor. Então, a EMBRACO S/A (Whirlpool - Unidade Compressores) percebeu a necessidade de melhorar, principalmente, a rugosidade do cilindro de seus compressores herméticos visando otimizar o desempenho deste.

Assim sendo, surgiu a ideia por parte da empresa de efetuar uma operação de acabamento nos cilindros, visando eliminar os picos isolados presentes na superfície e arredondar o cume da maior quantidade de picos com o intuito de evitar o contato metal-metal e garantir a vedação do par cilindro-pistão por meio do lubrificante. Para tanto, a empresa propôs a utilização do processo de brunimento flexível utilizando-se a ferramenta *Flex-Hone*.

Existem outras técnicas de brunimento que poderiam ser utilizadas para efetuar a operação de acabamento dos cilindros. As principais são: o brunimento platô (ANDRETTA, 2001; MACHADO, 2008; JUNIOR, 2009; PAWLUS, 2009; CORRAL, 2010; REJOWSKI, 2012), o brunimento por jato d'água (REJOWSKI, 2012), o brunimento por laser (ANDRETTA, 2001; REJOWSKI, 2012), o brunimento deslizante (REJOWSKI, 2012) e o brunimento espiral deslizante (REJOWSKI, 2012). Contudo, estas tecnologias são onerosas em relação ao brunimento flexível, que constitui uma alternativa conveniente para atender a demanda por uma alta exatidão dimensional e geométrica do cilindro, de forma simples e econômica.

O processo de brunimento flexível foi introduzido no meio industrial na década dos anos 90 e apesar de conhecidas suas importantes vantagens no que diz respeito aos baixos custos envolvidos, à simplicidade de operação e à redução significativa da rugosidade, este processo tem sido pouco estudado. Devido aos poucos trabalhos encontrados na literatura que abordam este assunto, pesquisas devem ser conduzidas para solucionar algumas questões que ainda geram dúvidas ou não foram resolvidas.

De acordo com Anderberg et al. (2009) distinguir de forma apropriada as superfícies obtidas nos diferentes estágios do brunimento constitui um desafio. Isto porque existem diversos parâmetros de rugosidade e curvas relacionadas que podem ser utilizados para caracterização de superfícies brunidas. Observa-se, na literatura estudada que não há um consenso neste sentido. Os trabalhos desenvolvidos por Dynarowski e Nowicki (2001), Anderberg et al. (2009), Corral e Calvet (2011), Vrac et al. (2014) utilizam 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 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, nem indicar se estes são em sua maioria picos ou vales. 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.

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 brunidas. No entanto, o uso desses parâmetros foi criticado por Zipin (1990), que destacou que sua conexão com a realidade física é tênue.

Outros parâmetros como o volume de retenção de óleo (Vo) e o coeficiente de vazio dado pela relação Rp/Rt fornecem informações valiosas para este tipo de superfície e, portanto, também devem ser avaliados. O parâmetro Vo é pouco conhecido e consequentemente pouco utilizado, ele representa o volume de retenção de óleo, ou seja, a capacidade da superfície em manter o filme lubrificante. Esta condição de lubrificação é essencial para o bom funcionamento do par cilindro/pistão. Já 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 Rp/Rt . Cabe ressaltar que as partículas de desgaste desprendidas durante as primeiras horas de funcionamento do compressor hermético se unem ao óleo lubrificante tornando-se um abrasivo.

Pawlus (1994, 1997) após analisar 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. Neste sentido 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, 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, uma vez que estes parâmetros permaneceram constantes durante o desenvolvimento do trabalho.

Neste contexto, surgiu a proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal avaliar a rugosidade do cilindro de blocos de compressores herméticos submetidos ao processo de brunimento flexível utilizando-se um centro de usinagem CNC e a ferramenta *Flex-Hone* considerando diferentes valores dos parâmetros de corte. Para tanto é proposto um planejamento fatorial completo para investigar os efeitos das condições de usinagem (rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta) na rugosidade. Se apresenta, ainda, a avaliação da incerteza de medição através da aplicação da metodologia proposta no JCGM 100 (BIPM et al., 2008).

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo Principal*

Este trabalho objetiva avaliar por meio de um planejamento fatorial completo o efeito dos parâmetros de corte (rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta) do processo de brunimento flexível na rugosidade do cilindro de blocos de compressores herméticos.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Contribuir para o entendimento do processo de brunimento flexível, identificando suas vantagens e desvantagens;
- Desenvolver um procedimento para execução do processo de brunimento flexível do cilindro utilizando-se a fresadora CNC, que reúne entre outros aspectos a especificação do diâmetro da ferramenta e os parâmetros de corte, tais como, rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta.
- Avaliar o acabamento superficial das peças brunidas através dos parâmetros de rugosidade Vo (volume de retenção de óleo) e relação Rp/Rt (coeficiente de vazio) pouco investigados;
- Contribuir para a rastreabilidade dos resultados de medição através da avaliação e declaração da incerteza de medição.

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

Capítulo II: Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o estado da arte 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).

Capítulo III: Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para investigar o efeito das condições de corte rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta nos parâmetros de rugosidade das peças usinadas por brunimento flexível. Esta metodologia inclui a definição do planejamento fatorial completo $2x2x3$; o brunimento convencional dos cilindros por parte da EMBRACO; a definição da estratégia de medição da rugosidade; a avaliação da

incerteza de medição dos diferentes mensurandos; e o brunitimento flexível dos cilindros utilizando uma fresadora CNC.

Capítulo IV: Apresentação dos resultados obtidos em cada etapa descrita no Capítulo III, seguida da análise e discussão. A análise da variância dos resultados para investigar os efeitos dos fatores de influência nas variáveis de saída é apresentada, bem como a comparação dos resultados obtidos após a aplicação de cada um dos processos.

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

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

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho, são eles: compressor recíproco alternativo hermético; processos de usinagem por abrasão, especialmente os de brunimento convencional e flexível; rugosidade, enfatizando as normas técnicas ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008); incerteza de medição e planejamento experimental com análise estatística (ANOVA) utilizando o programa Statistica 7.0.

2.1. Compressor recíproco alternativo hermético

O compressor é um dos principais componentes de um sistema de refrigeração, tendo como função principal a circulação do fluido refrigerante dentro do circuito. Pode ser dividido em dois tipos: o de deslocamento positivo e o dinâmico. Nos compressores de deslocamento positivo o gás é comprimido por redução de volume como no compressor alternativo e rotativo. Já nos dinâmicos, o gás é acelerado pelas pás do rotor e sua velocidade é convertida em pressão, similar ao compressor centrífugo de um estágio ou de vários estágios. No caso do compressor alternativo investigado neste trabalho, o processo de compressão é realizado por um pistão que reduz o volume de refrigerante na câmara de compressão por meio da ação de um mecanismo biela-manivela. O conjunto formado por cilindro e pistão, presente neste compressor, deve apresentar um adequado ajuste de geometrias, afim de evitar vazamentos, desgastes, bem como para minimizar atritos, aumentando a eficiência e a confiabilidade do mesmo (ROSA, 2012).

Os compressores alternativos são construídos em distintas concepções, destacando-se entre elas os tipos aberto, semi-hermético e hermético. No tipo aberto, o eixo de acionamento atravessa a carcaça, sendo, portanto, acionado por um motor exterior; no semi-hermético, a carcaça exterior aloja tanto o compressor quanto o motor de acionamento, sendo possível a remoção do cabeçote para acesso às válvulas e pistões. Já nos compressores recíprocos alternativos herméticos a carcaça só apresenta os acessos de entrada e de saída do refrigerante e para as conexões elétricas do motor. O motor e a unidade compressor são montados em um mesmo eixo, os quais são instalados dentro de um corpo de aço, cuja tampa é soldada hermeticamente (selada) após a montagem do conjunto (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002). A vista superior e em corte dos principais componentes do compressor recíproco alternativo hermético, fabricado pela EMBRACO, pode ser observada na Fig. 2.1.

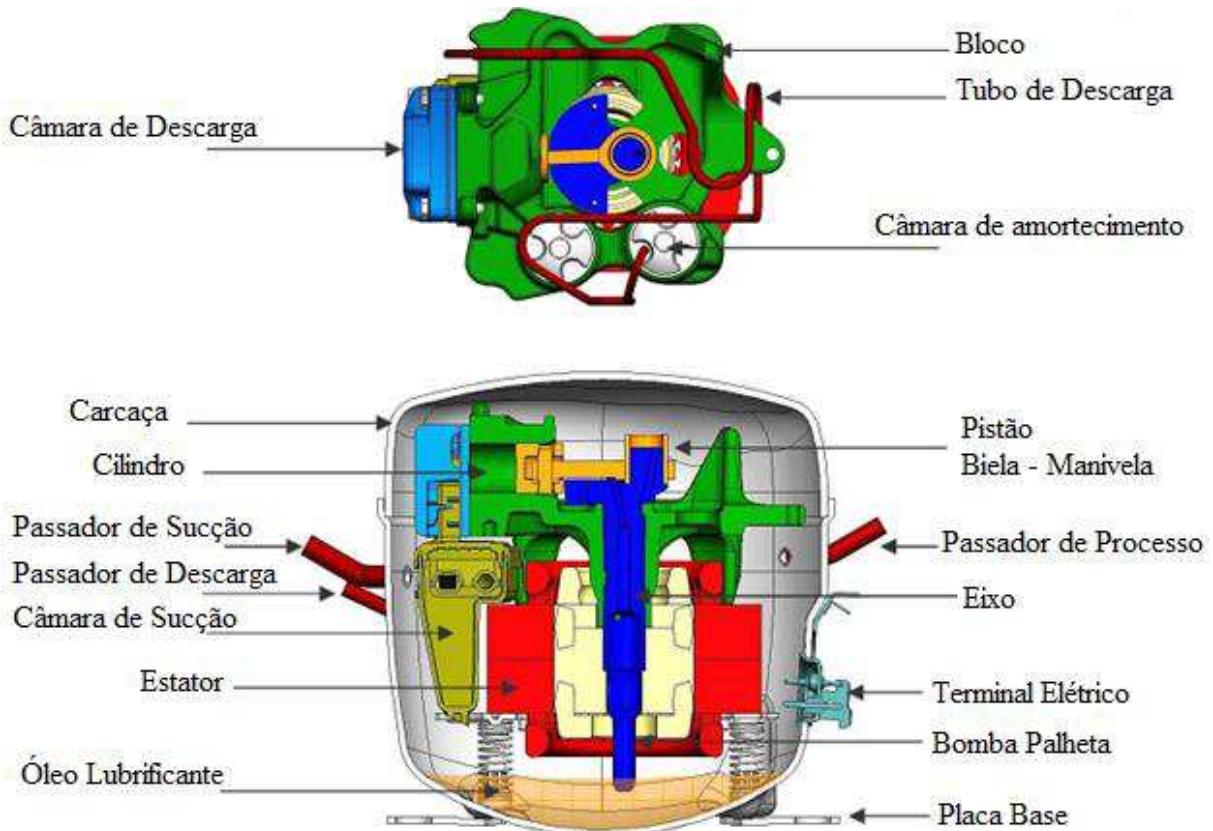


Figura 2.1 - Componentes do compressor recíproco alternativo hermético (RECABARREN, 2007).

O conjunto interno do compressor é envolvido por duas placas estampadas em formato côncavo que constituem a carcaça. Após a montagem dos componentes mecânicos, a tampa e a base da carcaça são soldadas, tornando o compressor totalmente hermético.

2.1.1. Princípio de funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético

O funcionamento de um compressor recíproco alternativo hermético é descrito a seguir: quando a energia elétrica é fornecida ao motor do compressor, este entra em funcionamento, e gera movimento circular sobre seu eixo, que por sua vez, é transformado, através do conjunto biela-manivela, em movimento retilíneo uniforme do pistão. Com o auxílio das válvulas de sucção e descarga, o movimento do pistão provoca a transferência de fluido do lado de baixa pressão para o de alta pressão, conforme o esquema na Fig. 2.2 (HENKLEIN, 2006).

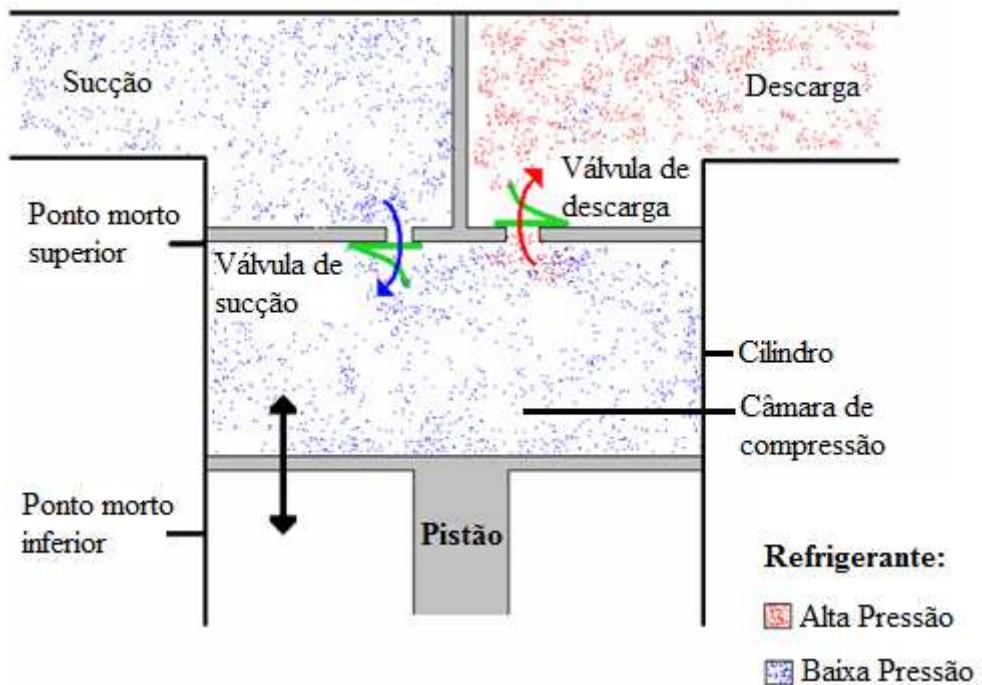


Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético (HENKLEIN, 2006).

O movimento do pistão possui dois limites físicos, o ponto morto superior e o ponto morto inferior, e as válvulas são comandadas unicamente pela diferença de pressão. Durante a admissão, o pistão está no sentido ponto morto superior para ponto morto inferior e a pressão interna do cilindro tende a ser menor do que a do evaporador, provocando a abertura da válvula de sucção. Durante toda a etapa a pressão interna é menor do que a pressão de descarga, assim

a válvula de descarga permanece fechada. Posteriormente inicia a compressão, em que o pistão movimenta-se no outro sentido e a pressão intermediária é maior do que a do evaporador, porém, menor do que a do condensador. Esta situação permanece até que a pressão na câmara do cilindro seja ligeiramente maior do que a do condensador, provocando a abertura da válvula de descarga e, consequentemente, a saída do gás. Em seguida se inicia a expansão. A pressão intermediária é tal que ambas as válvulas estão fechadas. Somente quando a pressão interna tende a ser menor do que a do evaporador é que a válvula se abre iniciando, então, um novo ciclo de compressão.

2.1.2. Cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético

A câmara de compressão (cilindro), na qual trabalha o pistão, requer elevada exatidão dimensional e geométrica, a fim de minimizar o atrito gerado pelo contato metal-metal entre o cilindro e o pistão e evitar vazamentos e desgastes.

O material utilizado para a fabricação do bloco do compressor recíproco alternativo hermético é o ferro fundido cinzento, que é a liga de maior aplicação na indústria atualmente. Esta liga apresenta uma microestrutura com carbono na forma livre, grafita em formato de lamelas e carbono na forma combinada cementita (Fe_3C). Nos ferros fundidos cízentos, os principais elementos de liga são o carbono e o silício, podendo também haver outros, como o manganês, cromo e cobre, atribuindo características específicas ao material de acordo com o teor encontrado (LOBO, 2015).

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

A fabricação do cilindro do bloco do compressor é caracterizada pelo emprego de diferentes processos de usinagem como furação, alargamento e brunimento. As tolerâncias dimensionais e geométricas 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 do cilindro do compressor recíproco alternativo hermético utilizam-se ferramentas denominadas como brunidor precidor (Fig. 2.3) ou bucha expansiva.



Figura 2.3 - Brunidor do tipo precidator utilizado no brunimento de blocos de compressores herméticos (BRUNITEC, 2016).

A ferramenta brunidor precidator possibilita atender tolerâncias de forma, como o desvio de circularidade, de até 1 μm . O projeto do precidator com seu mandril ajustável, combinado a um corpo maciço revestido com abrasivos ou com réguas abrasivas expansíveis é projetada especificamente para a execução de usinagem em furos longos, com ou sem interrupção (NAGEL, 2016).

Este trabalho investiga uma operação de usinagem de acabamento, denominada de brunimento flexível, que é realizado no cilindro do bloco compressor recíproco alternativo hermético, após a operação de brunimento convencional que utiliza-se a ferramenta brunidora do tipo precidator. Assim, a seguir, serão abordados esses processos de usinagem.

2.2. Processos de usinagem por abrasão

Segundo a norma DIN 8580 (DIN, 2003), usinagem é o processo de fabricação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação de qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco, sendo esse a porção de material da peça retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar forma irregular. Quando este processo empregar abrasivos ligados ou soltos, receberá o nome de usinagem por abrasão.

Dentre os principais processos de usinagem por abrasão estão: o brunimento, a retificação, a lapidação e o polimento. A característica comum a todos estes processos é o fato de a remoção de material ser predominantemente realizada por processo abrasivo, porém,

diferentemente da tribologia clássica, neste caso o desgaste abrasivo é um processo desejável, responsável pela remoção de material nas peças usinadas (MARINESCU et al., 2013).

A usinagem por abrasão é um processo no qual partículas duras abrasivas são empregadas com objetivo de modificar a forma ou a textura da superfície de peças manufaturadas. Este tipo de processo é geralmente aplicado a peças que exigem elevada exatidão dimensional e geométrica. Na Fig. 2.4 é apresentada uma comparação das faixas típicas de rugosidade obtidas para alguns processos de fabricação. Em destaque o processo de brunimento que apresenta uma rugosidade média R_a na faixa de 0,1 a 0,8 μm .

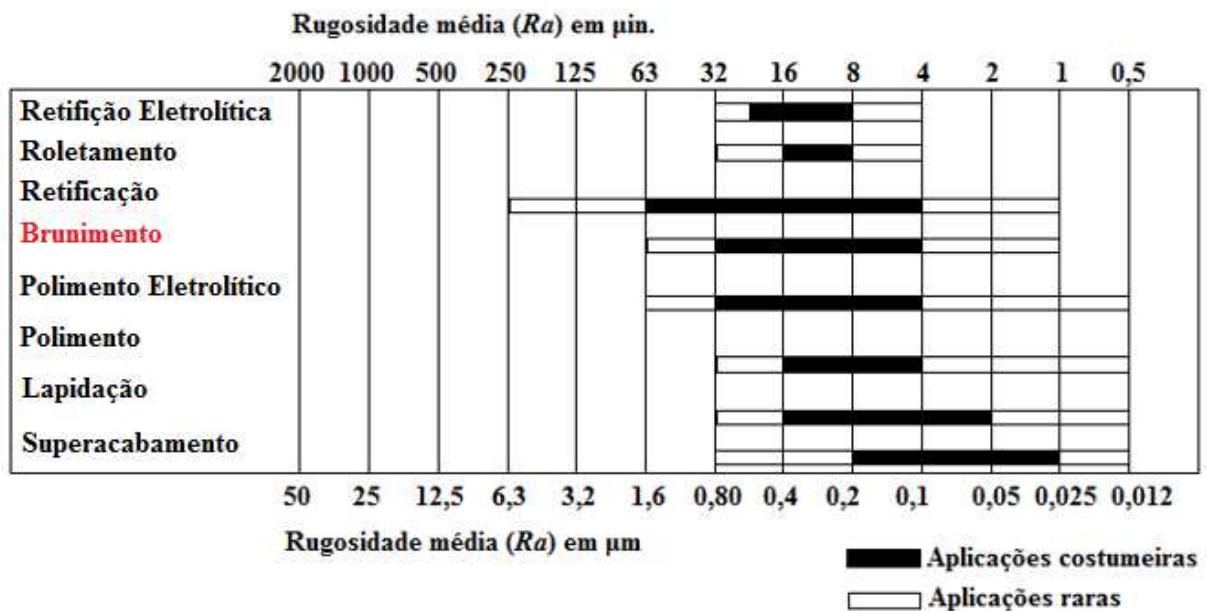


Figura 2.4 - Valores de rugosidade média (R_a) para algumas operações de usinagem (AARON et al., 1995).

Dos processos relacionados à usinagem por abrasão, neste estudo será abordado especificamente o brunimento.

2.2.1. *Brunimento*

O brunimento é um processo de usinagem que pode, de forma econômica, produzir furos de alta precisão, no que diz respeito a sua geometria e qualidade superficial. Esta operação é principalmente utilizada para acabamento final em peças que utilizam funcionalmente a superfície cilíndrica gerada. O acabamento superficial gerado pelo brunimento propicia uma boa capacidade de retenção de lubrificantes. Assim, esse processo é recomendado para

aplicações de guias cilíndricas para peças móveis, como bloco de motores, cilindros de compressores, cilindros hidráulicos e componentes de sistemas de injeção diesel (BÄHRE, SCHMITT e MOOS, 2012).

A Figura 2.5 apresenta uma relação entre os diferentes tipos de processos de acabamento de superfícies com os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade Rk , Rpk e Rvk (rugosidade do núcleo, região de pico e região de vale). Estes parâmetros permitem avaliar o fenômeno de desgaste, retenção de lubrificante e a região superficial de adequado funcionamento do motor. Verifica-se que para os processos de brunimento *Plateau* e *Brush*, têm-se menores valores de Rk e vales relativamente profundos, quando comparados ao processo de brunimento convencional (JOCSAK et al, 2005).

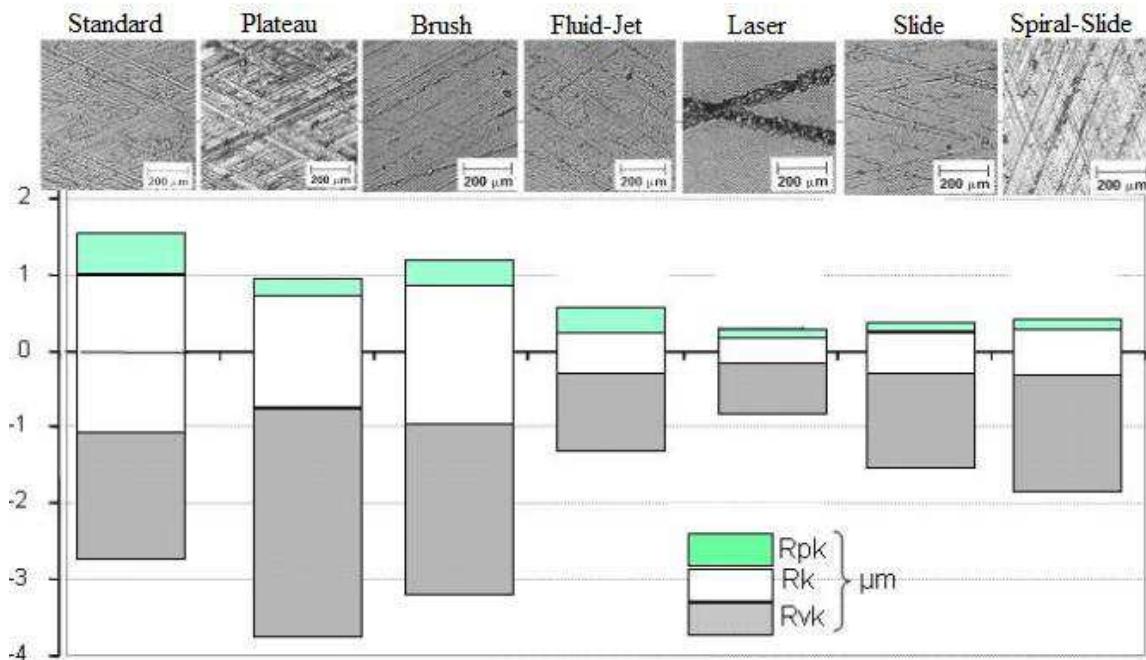


Figura 2.5 - Valores de rugosidade Rk , Rpk e Rvk para os diferentes processos de acabamento superficial em linha de produção (JOCSAK et al, 2005).

No processo de brunimento o material é removido pela penetração gradativa dos grãos abrasivos na peça combinado com os movimentos simultâneos alternado (de avanço) e rotacional da ferramenta abrasiva, Fig. 2.6a. A operação ocorre normalmente a rotações baixas. Em virtude disso, material é removido devido à ação cisalhante dos grãos aglomerados da pedra de brunimento, com pouco aumento da temperatura da peça (AARON, 1995).

O movimento da rotação e do avanço do cabeçote brunidor descreve na peça usinada trajetórias helicoidais gerando marcas típicas em formato de hachurado com traços entrelaçados, conforme Fig. 2.6b. As ranhuras geradas pelo processo de brunimento têm a importante função de retenção de óleo na parede do cilindro e o ângulo de cruzamento das ranhuras é especificado a fim de garantir a correta lubrificação do sistema pistão-cilindro. Quando as velocidades de avanço e rotação são iguais, o ângulo de cruzamento é 90° . Nos casos em que a rotação excede a velocidade de translação, o ângulo é menor que 90° .

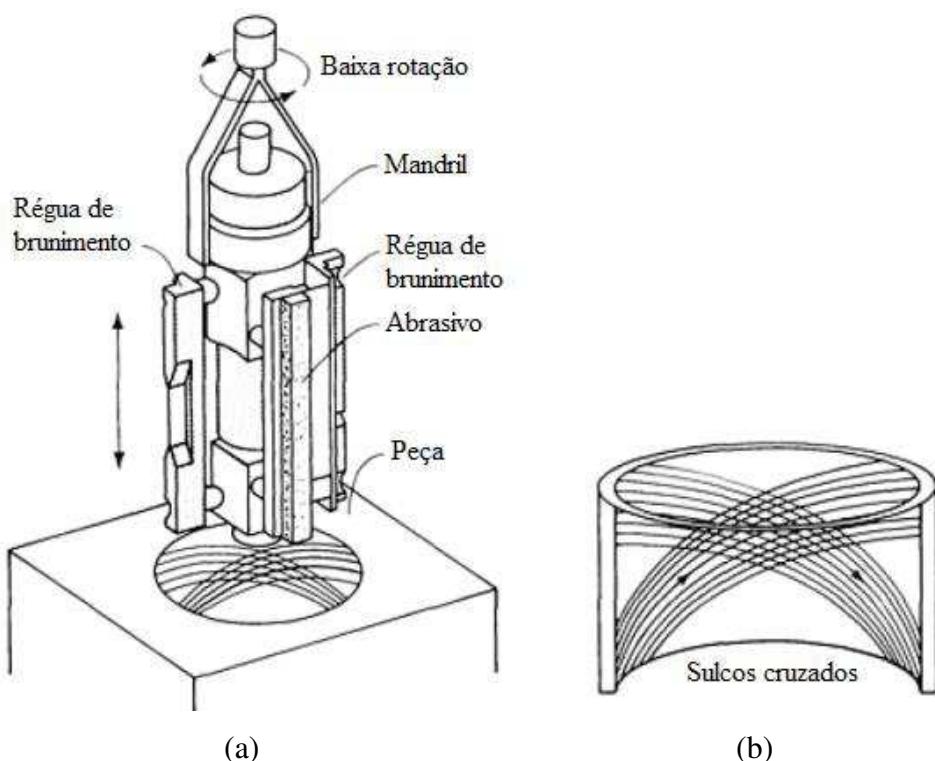


Figura 2.6 - (a) Direções de corte no brunimento e (b) superfície cruzada, gerada por este processo (AARON, 1995).

Balasubramanian et al., 1987 *apud* Andretta (2001) afirmam que o brunimento permite a remoção rápida e econômica de partículas, com aquecimento e distorção mínima, além de geração de superfícies circunferenciais e de corte retilíneo, corrigindo desvios geométricos anteriores à operação e obtenção do acabamento desejado da superfície, com boa qualidade dimensional.

Diferentes parâmetros de usinagem influenciam a rugosidade da peça, entre os principais parâmetros no brunimento estão: pressão de contato entre os abrasivos e a peça, rotação e velocidade de avanço da ferramenta, o tipo de fluido de corte utilizado, temperatura de

usinagem, tipo de abrasivos ou pedras de brunimento, tipo de ligante, tamanho do grão abrasivo, concentração de abrasivos e a rigidez da ferramenta. Sabe-se que a redução do tamanho do grão abrasivo diminui a rugosidade no processo de brunimento. O aumento da pressão entre os abrasivos e a peça aumenta a rugosidade. Já o aumento da rotação da ferramenta diminui a rugosidade da peça (CORRAL; CALVET; SALCEDO, 2010).

2.2.2. Mecanismo de formação do cavaco no brunimento

Durante a usinagem no processo de brunimento, as arestas de corte dos grãos abrasivos penetram na superfície da peça em uma trajetória que ocasiona estados transientes de corte e deformações plásticas na superfície usinada, como mostrado na Fig. 2.7.

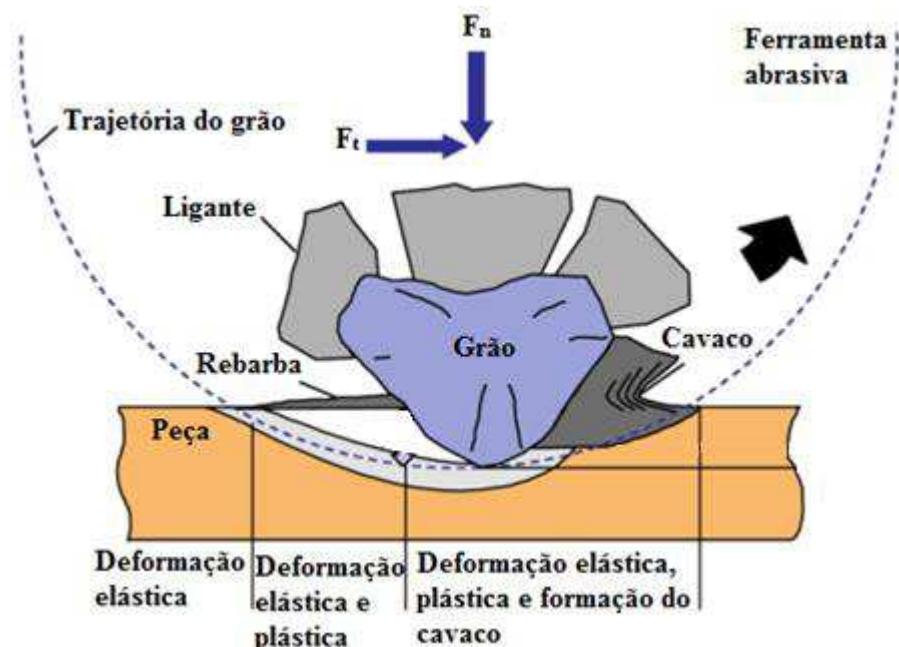


Figura 2.7 - Mecanismo de formação de cavaco por abrasão - zonas de deformação elástica e plástica (KLOCKE, 2009).

Segundo Klocke (2009), a formação de cavaco no processo de usinagem com ferramentas que utilizam grãos abrasivos ancorados por uma liga, é dada inicialmente pela penetração da aresta de corte do grão abrasivo na peça. Após esta fase de deformação elástica, o grão segue uma trajetória plana e inicia-se um fluxo de deformação plástica do material da peça usinada. Devido à forma da aresta de corte do grão, o ângulo formado entre o contorno da aresta de corte do grão com a superfície da peça é no início desta fase muito pequeno, e não há formação de cavaco neste instante. O material da peça é deformado lateralmente, formando elevações ou

fluxos deste material abaixo da aresta de corte em seu flanco. É a partir deste momento que a formação de cavaco se inicia. Enquanto esta sequência continua, o processo de deformação e a formação do cavaco ocorrem simultaneamente.

A determinação das arestas de corte é dificultada pela complexa microestrutura das ferramentas. Devido à grande quantidade de grãos atuando na peça, o material removido é formado pela soma de muitas diferentes arestas de corte, que removem individualmente o cavaco da superfície do material (KLOCKE, 2009). Na Figura 2.8 é mostrado este princípio da formação do cavaco e o aspecto do corte feito pela penetração individual de um grão abrasivo.

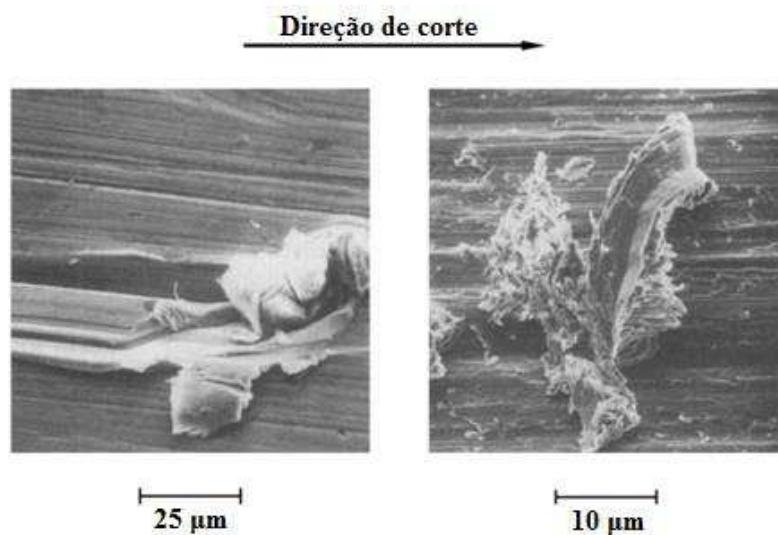


Figura 2.8 - Aspecto ampliado por um microscópio eletrônico da direção de corte e do cavaco gerado na peça por um grão abrasivo (KLOCKE, 2009).

2.2.3. Cinemática do processo de brunimento

Os principais parâmetros envolvidos com a cinemática da operação de brunimento interno de curso longo são a velocidade de avanço e a rotação do cabeçote brunidor. Essas duas grandezas caracterizam o chamado ângulo de brunimento ou de cruzamento α . Na Figura 2.9 observa-se os vetores oriundos do avanço e da rotação da ferramenta, outrossim a velocidade de corte.

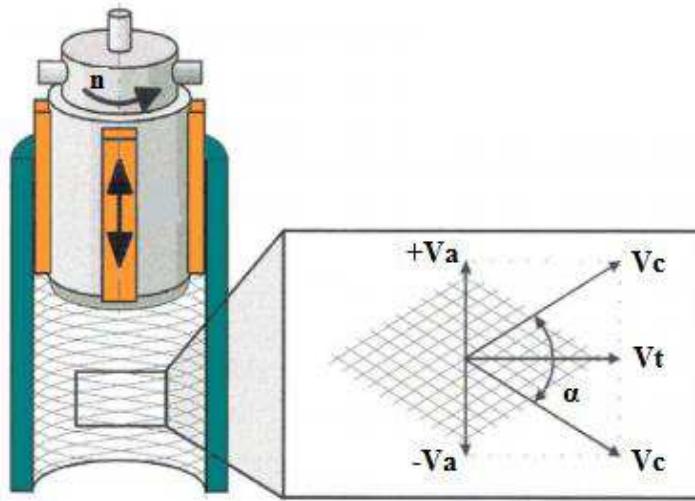


Figura 2.9 - Vetores velocidade de corte, tangencial e avanço (SABRI; MANSORI, 2009).

A velocidade de corte V_c , obtida pela soma dos vetores V_a e V_t , é expressa em m/min e pode ser calculada por meio da Eq. (2.1).

$$V_c = \sqrt{V_a^2 + V_t^2} \quad (2.1)$$

Os vetores $+V_a$ e $-V_a$ representam à velocidade de avanço que o cabeçote brunidor executa dentro do cilindro, ao passo que o vetor V_t é à velocidade tangencial que aparece em decorrência do movimento de rotação do cabeçote.

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

$$V_t = \pi \cdot d_c \cdot n_r \quad (2.2)$$

Onde V_t é a velocidade tangencial (m/min), d_c é o diâmetro interno do cilindro (mm) e n_r é a rotação do cabeçote brunidor (min^{-1}).

A partir da Eq. (2.2) pode-se reescrever a velocidade de corte V_c , conforme a Eq. (2.3).

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

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

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{V_a}{V_t} \quad (2.4)$$

2.2.4. Tipos de grãos e ligantes utilizados no brunimento

Nas operações de brunimento, os grãos abrasivos ou partículas abrasivas que promovem a ação do corte na peça, precisam suportar a pressão necessária para a remoção de material. Estes grãos abrasivos podem ser divididos em duas categorias: convencionais e superabrasivos. As ferramentas para brunimento utilizam grãos de materiais como o óxido de alumínio para usinagem em aços de baixa dureza, e o carbeto de silício é aplicado em ferro fundido e materiais não ferrosos. Os brunidores em superabrasivos, utilizam grãos de diamante ou CBN. Os grãos de diamante são aplicados no brunimento de metal duro, cerâmicas e vidro, não sendo adequado para a usinagem em aços devido a afinidade química do diamante com o carbono. Os grãos em CBN são aplicados em aços endurecidos, de média dureza e super ligas (KRAR; RATTERMAN, 1990).

Segundo Chandler et al. (1989), a seleção do tamanho do grão no brunimento depende principalmente da taxa de remoção de material e do acabamento desejados. Grãos maiores removem o material mais rapidamente, porém acarretam em um acabamento mais grosseiro. Por esta razão, o brunimento de desbaste seguido de uma operação de acabamento é geralmente mais econômico.

A seleção do abrasivo depende principalmente da dureza e da composição do material da peça a ser usinada, do acabamento requerido e de fatores de custos.

A liga aglomerante (também denominado ligante ou aglutinante) tem a função de unir os grãos abrasivos entre si e também, se for o caso, com o suporte (ferramenta). Os ligantes se dividem em dois grandes grupos: inorgânicos e orgânicos. Os inorgânicos podem ser vitrificados (V), siliciosos (S), de magnesita (O) ou metálicos (M). Os orgânicos podem ser goma-laca (E), borracha (R) ou resinoide (B). Dentre todos, destacam-se as ligas vitrificadas e as resinoides.

Cada tipo de ligante apresenta características próprias quanto à capacidade de retenção do grão, resistência ao impacto, resistência térmica e à erosão do cavaco. Em geral, o ligante deve ser forte o bastante para resistir às forças de corte, a temperatura e a força centrífuga sem desintegrar, além de resistir ao ataque químico do fluido de corte.

2.2.5. Brunimento flexível

O brunimento flexível é uma operação utilizada após o brunimento convencional que atua por intermédio de partículas abrasivas e elásticas de maneira a não alterar as características geométricas, tais como, cilindricidade, concentricidade e coaxilidade (MILLER, 1993).

Pode-se classificar o brunimento flexível em dois tipos: 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 ligados às pontas de filamentos de nylon flexível. Cada glóbulo abrasivo é composto de múltiplas camadas, que se degradam a uma taxa controlada de exposição continua das arestas cortantes (MILLER, 1993). Esta ferramenta possui diâmetro maior do que o furo onde irá atuar, obtendo-se a pressão de contato através da diferença de diâmetros. Desta forma, as pressões de contato são baixas, o que proporciona uma taxa de remoção de material menor quando comparado com o processo de brunimento convencional.

No brunimento flexível do tipo escovas ou cerdas existem dois tipos de ferramentas brunidoras. Uma consiste de uma vareta giratória, muito parecida com escovas de limpar garrafas, que possui cerdas monofilamentosas de nylon impregnadas de abrasivos, no qual o processo de corte consiste no chicoteamento da superfície da peça, pelos monofilamentos de nylon (VISQUE, 1998). A outra consiste em filamentos de nylon impregnados de abrasivos, colocados lado a lado, formando uma seção retangular, com uma altura pré-estabelecida. Um suporte dá a coesão necessária ao agrupamento 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), a operação 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 utilizada neste trabalho é constituída por uma haste metálica rígida, “cerdas” poliméricas com pontas em forma de glóbulos abrasivos, que são arranjadas no formato de escova, 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, Fig. 2.10.

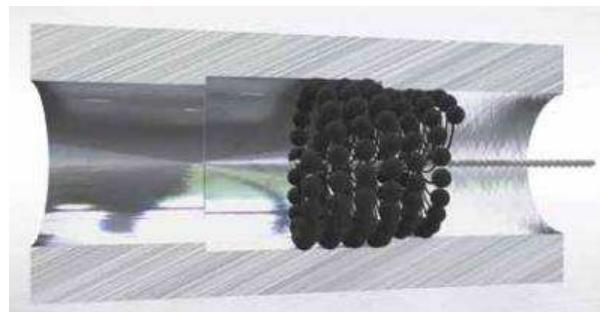


Figura 2.10 - Ferramenta brunidora flexível tipo esferas (BRM, 2015).

O uso desta ferramenta é indicado 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. 2.11. 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.

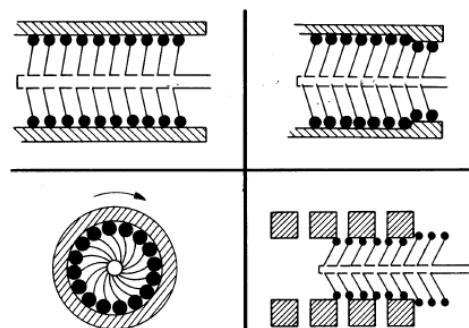


Figura 2.11 - Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2016).

Os fabricantes disponibilizam uma grande variedade de ferramentas, cujos diâmetros variam na faixa de 4 mm a 76 mm, fabricadas utilizando diferentes materiais abrasivos, conforme a Tab. 2.1, e diferentes granulações, que variam de 20 *mesh* a 800 *mesh* (VERTEC, 2016).

Tabela 2.1 - 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 remove picos e imperfeições das paredes de cilindros, criando o acabamento desejável, Fig. 2.12. O resultado é a redução do atrito, do aquecimento localizado e a melhoria geral no desempenho.

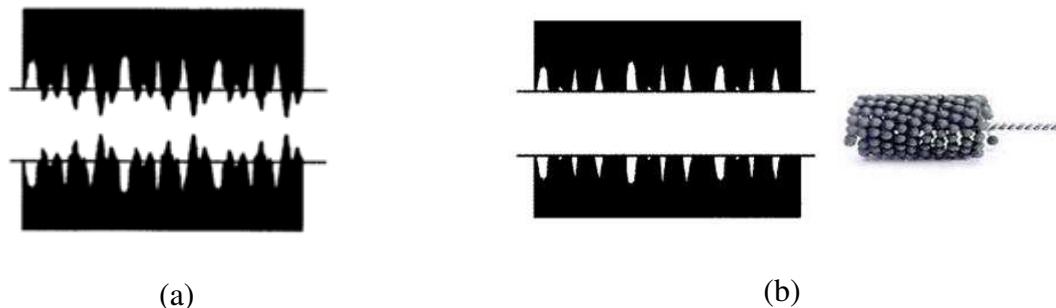


Figura 2.12 - (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (VERTEC, 2016).

Em trabalho recente Fernandes (2014) avaliou a qualidade dimensional e geométrica de 14 cilindros de blocos de compressores herméticos antes e após a realização do brunimento flexível. O autor concluiu que a operação de brunimento flexível apresenta remoção de material em pequenas quantidades provocando pouca variação dimensional. Em relação a rugosidade observou a eliminação de picos isolados e redução da altura destes, sem alterar a profundidade dos vales, proporcionando uma redução significativa dos valores dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rt , Rsk , Rk e Rpk e um aumento relevante do parâmetro Rku , indicando melhorias nas

propriedades de amaciamento da superfície, de retenção de lubrificantes, de resistência mecânica e da capacidade de suportar cargas em operações de contato.

Fernandes (2014) também observou uma redução significativa dos valores dos desvios de circularidade, com média percentual de 77%. Valores pequenos de desvios-padrão associados à circularidade, indicando elevada precisão.

2.3. Tolerâncias geométricas

Os sistemas de fabricação modernos são baseados no conceito de intercambiabilidade e funcionalidade, o que requer que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto à dimensão, forma e acabamento da superfície (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977). No caso da avaliação da qualidade geométrica dos cilindros de compressores recíprocos alternativos herméticos usinados pelo processo de brunimento, o critério mais utilizado é a rugosidade.

As normas técnicas ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) abordam as tolerâncias microgeométricas e são aplicadas para limitar os valores dos desvios de forma microgeométricos presentes na superfície da peça. Estes desvios são denominados de rugosidade e desempenham um papel importante no funcionamento dos componentes mecânicos, tais como: qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, possibilidade de ajuste do acoplamento forçado, resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, resistência à corrosão e à fadiga, vedação e aparência.

2.3.1 *Rugosidade*

A medição da rugosidade de uma superfície não é uma tarefa trivial, isto ocorre porque os desvios macrogeométricos, as ondulações e a própria rugosidade (desvio microgeométrico) apresentam-se sobrepostos na superfície real da peça, conforme indicado na Fig. 2.13. Os sinais de rugosidade apresentam maiores frequências e menores amplitudes quando comparados com os desvios macrogeométricos e as ondulações, que apresentam pequenas frequências grandes amplitudes. Portanto, durante a medição da rugosidade, devem-se aplicar filtros que permitam separar ou atenuar os sinais com frequências mais baixas, isto é, filtros passa-alta.

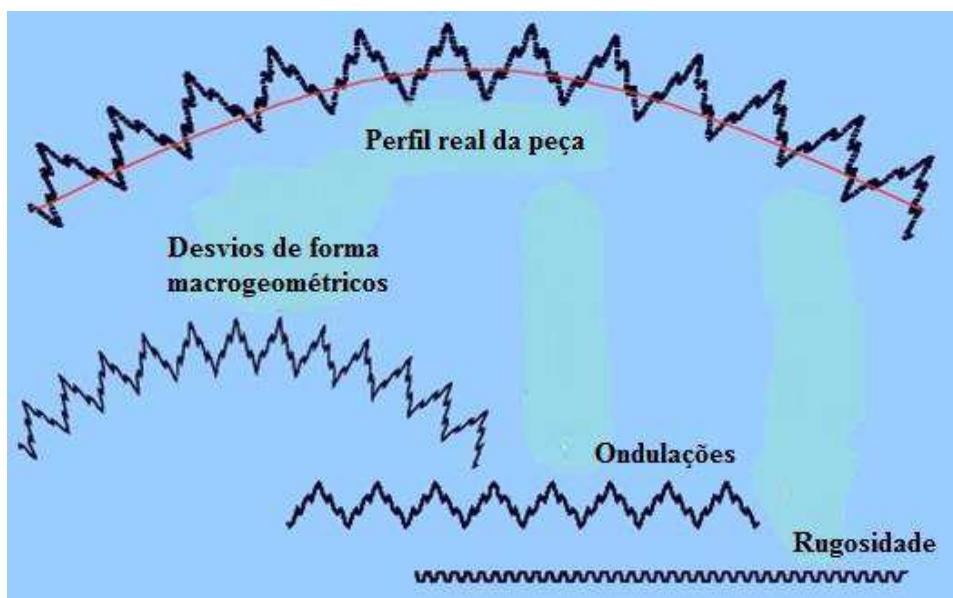


Figura 2.13 - Desvios macrogeométricos e microgeométricos (TAYLOR HOBSON, com modificações, 2003).

Para Piratelli-Filho (2011) a rugosidade é definida como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Este autor fornece uma definição mais abrangente sobre rugosidade que não se limita aos processos de usinagem.

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, onde somente as tolerâncias dimensionais, de forma e de posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado. Assim, a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade é fundamental para peças onde houver atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos, superfícies de medição, entre outros (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Uma das maneiras de se filtrar sinais de baixas frequências (altos comprimentos de onda), característicos das ondulações e dos demais desvios de forma, é a utilização do filtro denominado *cut-off* ou comprimento de amostragem, representado por l_r . Durante a avaliação da rugosidade com rugosímetros eletromecânicos, devem ser apalpados sete comprimentos de amostragem, sendo que a coleta dos valores é efetuada em cinco comprimentos de amostragem denominado comprimento de avaliação l_n , conforme a Fig. 2.14.

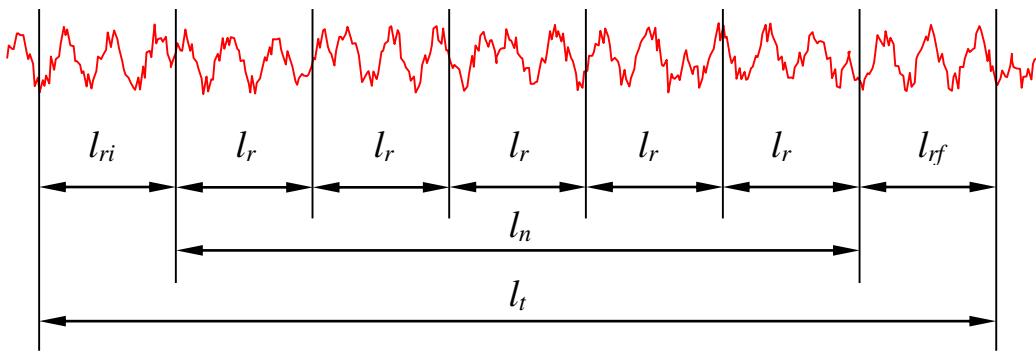


Figura 2.14 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994).

Na Figura 2.14, o l_{ri} (percurso inicial) tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição, o l_n (percurso de medição ou comprimento de avaliação) é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, o l_{rf} (percurso final) tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição, e o l_t (percurso de apalpamento) é o percurso total apalpado pelo sistema de medição, ou seja, é a soma dos percursos inicial, de medição e final.

A distância percorrida pelo apalpador dever ser igual a 5 (l_r) mais a distância para atingir a velocidade de medição (l_{ri}) e para a parada do apalpador (l_{rf}).

O comprimento de amostragem l_r , também chamada de *cut-off*, é um valor de frequência pré-determinado que define qual frequência deve passar e qual não deve passar (filtros passa-alta), objetivando eliminar o efeito dos desvios de forma macrogeométricos na avaliação da rugosidade (ondas de alta frequência). Pode ser estimado de acordo com a Tab. 2.2 da ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) relacionada com o valor de rugosidade R_a .

No Brasil, o sistema padronizado para medição da rugosidade é o sistema da linha média, de acordo com as Normas ABNT NBR ISO 4287 (2002) e ABNT NBR ISO 4288 (2008). Essa linha é definida como uma 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, como indicado na Fig. 2.15.

Tabela 2.2 - Comprimentos de amostragem em função e R_a para perfis não periódicos, segundo a ABNT NBR 4288 (ABNT, 2008).

R_a (μm)	Comprimento de amostragem da rugosidade - l_r (mm)	Comprimento de avaliação da rugosidade - l_n (mm)
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

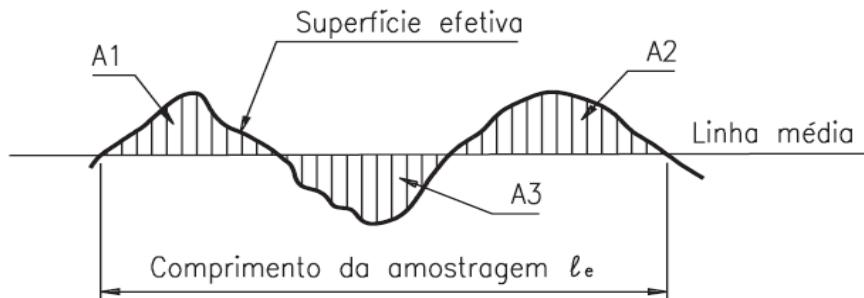


Figura 2.15 - Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Tomando como base o conceito de linha média, a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) divide os parâmetros geométricos que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade em três grupos: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos. Os parâmetros de amplitude são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície. Os parâmetros de espaçamento são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície. Já os parâmetros híbridos são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

Neste trabalho são abordados os seguintes parâmetros:

a) *Desvio aritmético médio do perfil (R_a)*

Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$, em relação à linha média num comprimento de amostragem l_r , dada pela Eq. (2.5).

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

O parâmetro R_a é o mais utilizado em todo o mundo, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação. Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam o mesmo. Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor. Para a maioria das superfícies, o valor do R_a está de acordo com a curva de *Gauss*, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Dentre as desvantagens do parâmetro R_a tem-se que seu valor em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. Seu valor não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter um valor de R_a para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem, sem fazer qualquer distinção entre picos e vales. Para processos com frequência muito alta de vales ou picos (sinterização), não é adequado, pois a distorção provocada pelo filtro ocasiona erros grandes.

b) *Desvio médio quadrático do perfil (Rq)*

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

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (2.6)$$

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.

c) *Altura máxima do pico do perfil (Rp)*

A altura máxima do pico do perfil (Rp) é a distância do pico máximo à linha média definido no comprimento de amostragem (l_r), Fig. 2.16.

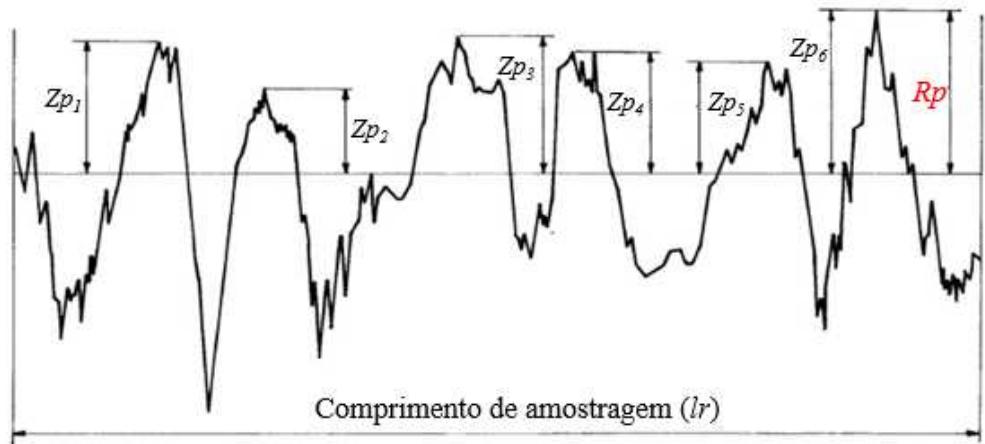


Figura 2.16 - Altura máxima do pico do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

d) *Profundidade máxima do vale do perfil (Rv)*

A profundidade máxima do vale do perfil (Rv) é a distância do vale máximo à linha média definido no comprimento de amostragem (lr), Fig. 2.17.

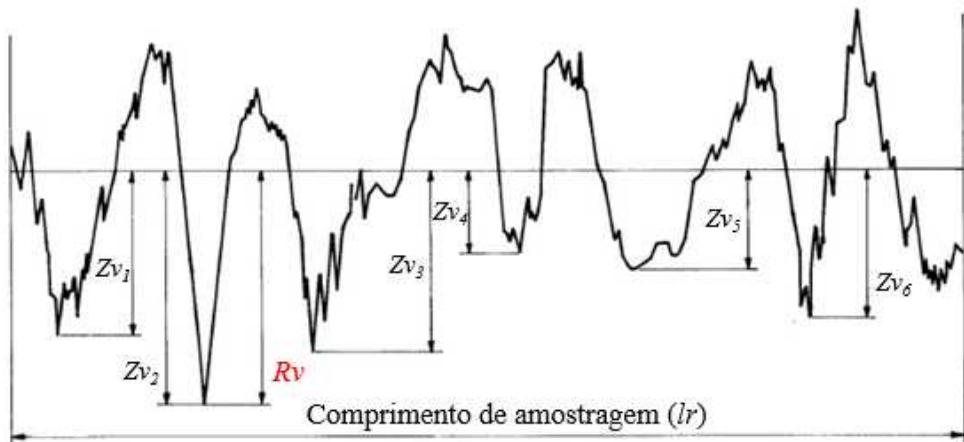


Figura 2.17 - Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

e) *Altura total do perfil (Rt)*

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. 2.18.

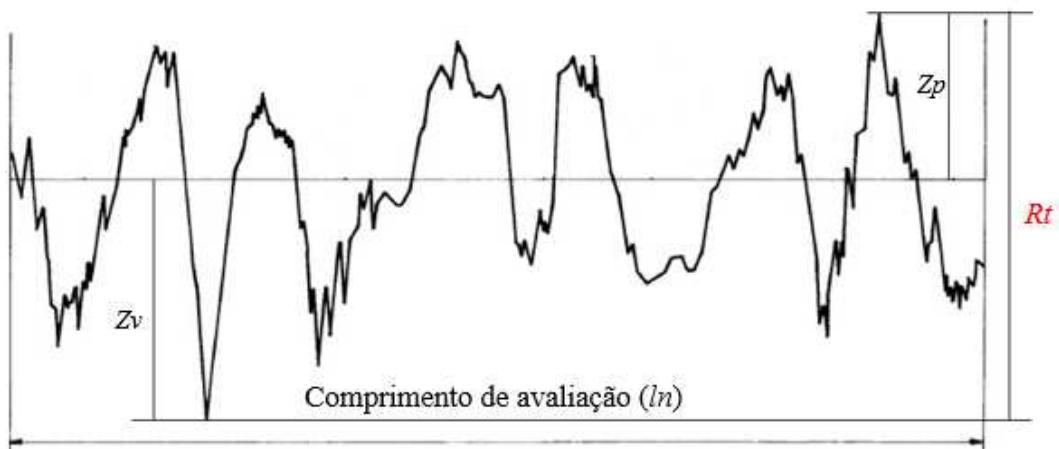


Figura 2.18 - Altura total do perfil, conforme a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

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.

f) Fator de assimetria do perfil - Skewness (Rsk)

Este parâmetro indica a assimetria da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas $Z(x)$ dos pontos do perfil em relação à linha média, e pode ser calculado através da Eq. (2.7).

$$Rsk = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] \quad (2.7)$$

Onde l_r é o comprimento de amostragem e Rq , o desvio médio quadrático do perfil avaliado. O fator de assimetria indica se as irregularidades da superfície são, na maioria, picos ou vales, Fig. 2.19.

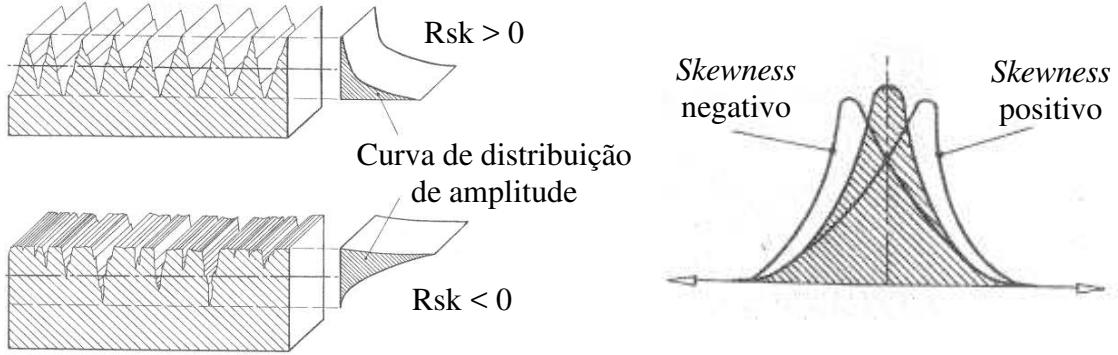


Figura 2.19 - Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

g) Fator de achatamento do perfil - Kurtosis (Rku)

É definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ e Rq à quarta potência, respectivamente, no comprimento de amostragem l_r , expresso pela Eq. (2.8).

$$Rku = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] \quad (2.8)$$

O parâmetro Rku é indicador do achatamento da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas. Este parâmetro mede a forma da curva de distribuição de amplitude, ou seja, seu afinamento ou achatamento, como mostrado na Fig. 2.20.

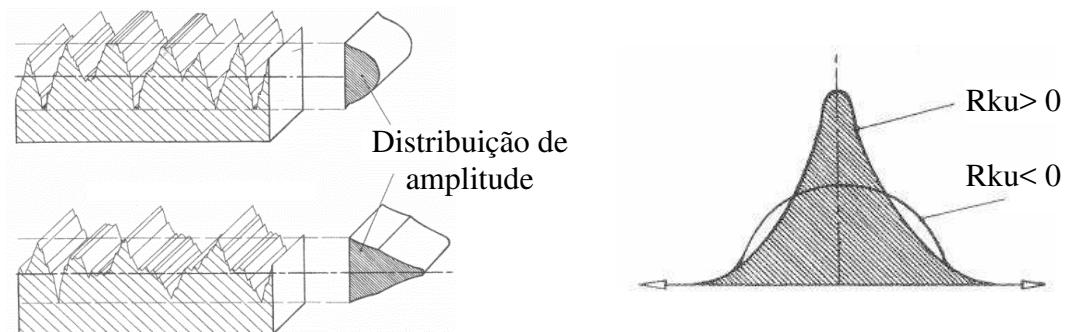


Figura 2.20 - Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

A avaliação do parâmetro Rku é complementar ao de assimetria (Rsk), principalmente para análise de atrito e de retenção de lubrificação nas superfícies usinadas (LEACH, 2001). 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 (SMITH, 2002).

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. 2.21.

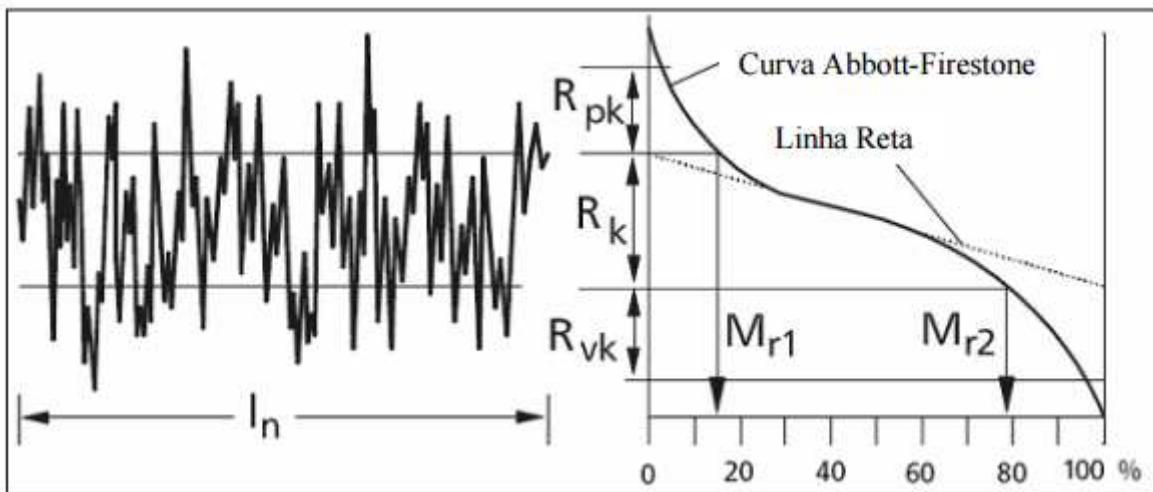


Figura 2.21 - Curva de *Abbott-Firestone* (TAYLOR HOBSON, 2000).

A curva de *Abbott-Firestone* é definida a partir de três parâmetros (Rk - rugosidade do núcleo do perfil, Rvk - região de pico e Rpk - 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, parâmetros como Vo (volume de retenção de óleo) e a relação Rp/Rt (coeficiente de vazio) também devem ser avaliados.

O parâmetro Vo é pouco conhecido e consequentemente pouco utilizado, ele representa o volume de retenção de óleo, ou seja, a capacidade da superfície em manter o filme lubrificante, Eq. (2.9). Já 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. (2.10). Estes dois parâmetros não são abordados pelas normas técnicas atualmente em vigor no Brasil.

$$Vo = \frac{(100 - MR_2)}{200} \cdot Rvk \quad (2.9)$$

$$CV = \frac{R_p}{R_t} \quad (2.10)$$

2.4. Incerteza de medição

O INMETRO (2012) define incerteza de medição como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Existem vários fatores que influenciam na incerteza total de medição. Dentre as fontes de incerteza, podem-se citar as condições ambientais, como umidade e temperatura; a prática do operador em manusear o instrumento ou a máquina de medição; as próprias variações associadas ao instrumento de medição; entre outras.

De acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda e tão somente uma estimativa do valor do mensurando oriunda da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

Para a avaliação da incerteza, o Guia da Incerteza de Medição (GUM) conceitua três tipos de incerteza: a padrão, a padrão combinada e a expandida.

2.4.1. Avaliando a incerteza-padrão

O JCGM 100 (BIPM et al., 2008) propõe que, na etapa inicial do cálculo da incerteza, sejam identificadas todas as variáveis que influenciam o resultado de medição. A quantidade e o tipo de grandezas de influência variam de acordo com o sistema de medição e com o tipo de mensurando analisado. Posteriormente é preciso formular um modelo matemático que englobe todas as variáveis, afim de construir a seguinte relação funcional, conforme Eq. (2.11).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.11)$$

A partir da Eq. (2.11), pode-se obter 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. (2.12):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.12)$$

As grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N , também podem ser consideradas mensurandos e depender de outras grandezas, incluindo correções e fatores de correção para efeitos sistemáticos, levando, por conseguinte, a uma complicada relação funcional f , que talvez nunca possa ser escrita de modo explícito.

2.4.2. Avaliação Tipo A da incerteza-padrão

A incerteza padrão do tipo A é obtida a partir de uma função densidade de probabilidade derivada da observação de uma distribuição de frequência, isto é, baseada em uma série de observações da grandeza. Segundo o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), a incerteza padrão do tipo A é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal, ou outra qualquer. Neste caso a incerteza padrão pode ser calculada utilizando-se a Eq. (2.13).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.13)$$

Onde s é o desvio padrão experimental e n é o número de elementos da amostra.

2.4.3. Avaliação Tipo B da incerteza-padrão

Para uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada $u^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u(x_i)$ deve ser avaliada através de outras informações: dados de medições prévias, experiência com ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos relevantes, especificações do fabricante, dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados e incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

Para muitos casos é possível encontrar declarado que a incerteza citada define um intervalo tendo um nível da confiança de 90 %, 95 % ou 99 %. Quando não for especificada uma distribuição diferente, pode ser utilizada a distribuição normal para calcular a incerteza padrão. Para tanto basta dividir a incerteza declarada pelo fator apropriado, que pode assumir valores, respectivamente, de 1,64, 1,96 e 2,58 para os três níveis de confiança citados.

Em outros casos, é possível estimar apenas os limites superior e inferior para X_i e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo $(a-, a+)$ é um e a

probabilidade para que o valor X_i esteja fora desse intervalo é zero. Para tais situações deve ser utilizada a distribuição retangular ou uniforme, Fig. 2.22a.

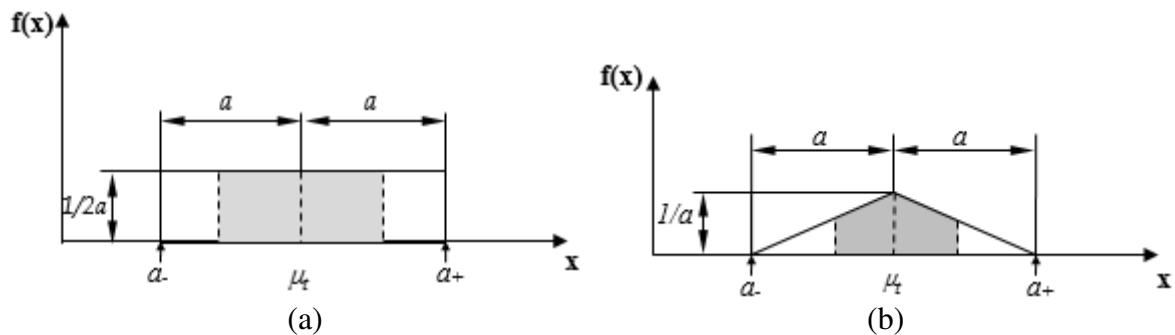


Figura 2.22 - (a) Distribuição retangular e (b) distribuição triangular (BIPM et al., 2008).

Quando não há conhecimento dos valores de X_i dentro do intervalo, pode-se apenas supor que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele. Ainda X_i pode assumir infinitos valores e consequentemente o seu grau de liberdade será infinito (LINK, 1997). Se a diferença entre os limites $a_+ - a_-$ é designada por $2a$, a variância estimada é calculada a partir da Eq. (2.14).

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (2.14)$$

Caso haja mais conhecimento sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, a distribuição de probabilidade passa para uma triangular, Fig. 2.22b, com infinitos graus de liberdade, que pode evoluir para uma normal.

A incerteza padrão do tipo B associada a uma grandeza com distribuição triangular é expressa a partir da Eq. (2.15).

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{6} \quad (2.15)$$

2.4.4. Determinando a incerteza- padrão combinada

Para determinação da incerteza padrão combinada o JCGM 100 (BIPM et al., 2008) divide as grandezas de entrada em dois grupos, descritos a seguir.

a) Grandezas de entrada não correlacionadas: para o caso em que as grandezas de entrada são independentes tem-se que a incerteza padrão combinada de uma estimativa y é representada por $u_c(y)$, a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, que é dada pela Eq. (2.16).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.16)$$

Onde f é a função que modela matematicamente o processo de medição, Eq. (2.12).

Como pode ser observado a Eq. (2.16) é baseada em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor e expressa a lei de propagação da incerteza.

b) Grandezas de entrada correlacionadas: a expressão apropriada para a variância combinada, associada com o resultado de uma medição é dada pela Eq. (2.17).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.17)$$

Onde x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j e $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada.

As derivadas parciais $\partial f / \partial x_i$, são denominadas coeficientes de sensibilidade, e descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Essa alteração é dada por $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i)(\Delta x_i)$. Se esta alteração é gerada pela incerteza-padrão da estimativa x_i , a variação correspondente em y é $(\partial f / \partial x_i)u(x_i)$.

2.4.5. Determinando a incerteza expandida

Em algumas aplicações, é necessário fornecer uma medida de incerteza que defina um intervalo em torno do resultado da medição, com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Esta incerteza é denominada incerteza expandida e é representada por U e pode ser obtida, multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , dado pela Eq. (2.18).

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.18)$$

De acordo com JCGM 100 (BIPM et al., 2008), o resultado de uma medição é então convenientemente expresso como $Y = y \pm U$, que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y , e que $y - U$ a $y + U$ é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y . Tal intervalo é também expresso como $y - U \leq Y \leq y + U$.

Quando o número de leituras for reduzido, caracterizando uma amostra pequena, deve ser utilizado o teorema do valor central junto com a tabela *t-student* para fornecer um valor de k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição.

O cálculo do grau de liberdade efetivo é baseado na equação de *Welch-Satterwaite*, conforme expresso na Eq. (2.19).

$$v_{efetivo} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} \quad (2.19)$$

2.5. Estimativa da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo (MC)

De acordo com INMETRO (2008) a metodologia de cálculo proposto pelo JCGM 100 (BIPM et al., 2008), para avaliação da incerteza de medição apresenta algumas limitações, tais como: linearização do modelo, suposição que o mensurando tem distribuição normal e determinação dos graus de liberdade efetivo da incerteza-padrão combinada. Devido a estas limitações o método de simulação de MC pode ser aplicado para a avaliação da incerteza de medição.

O método de MC é um procedimento numérico para a solução de problemas matemáticos por meio da simulação de variáveis aleatórias, combinando distribuições, de forma a obter aproximações numéricas de funções complexas em que não é viável, ou mesmo impossível, encontrar uma solução analítica. O método MC pode ser dividido nas seguintes etapas: definição do mensurando; elaboração do diagrama causa-efeito; identificação das funções densidade de probabilidade, correspondentes a cada fonte de entrada; estimativas das incertezas-padrão das fontes de entrada; seleção do número de iterações de MC; geração dos números aleatórios; identificação da função densidade de probabilidade do mensurando ou variável de saída Y e estimativa da incerteza expandida.

As quatro primeiras etapas da técnica MC são idênticas à metodologia de cálculo do JCGM 100 (BIPM et al., 2008). A quinta e a sexta etapa consistem em determinar o número de iterações e gerar os números aleatórios, a fim de obter resultados consistentes. Na sétima etapa é gerado um histograma de classes. O comportamento deste histograma determinará a função densidade de probabilidade da variável de saída.

Se a variável de saída apresentar comportamento normal e distribuição simétrica, determina-se a incerteza expandida como sendo duas vezes o desvio-padrão dos valores do mensurando, para k igual a 2 e probabilidade de abrangência de 95,45%.

A Figura 2.23 contém o esquema resumido das etapas para aplicação do método de MC.

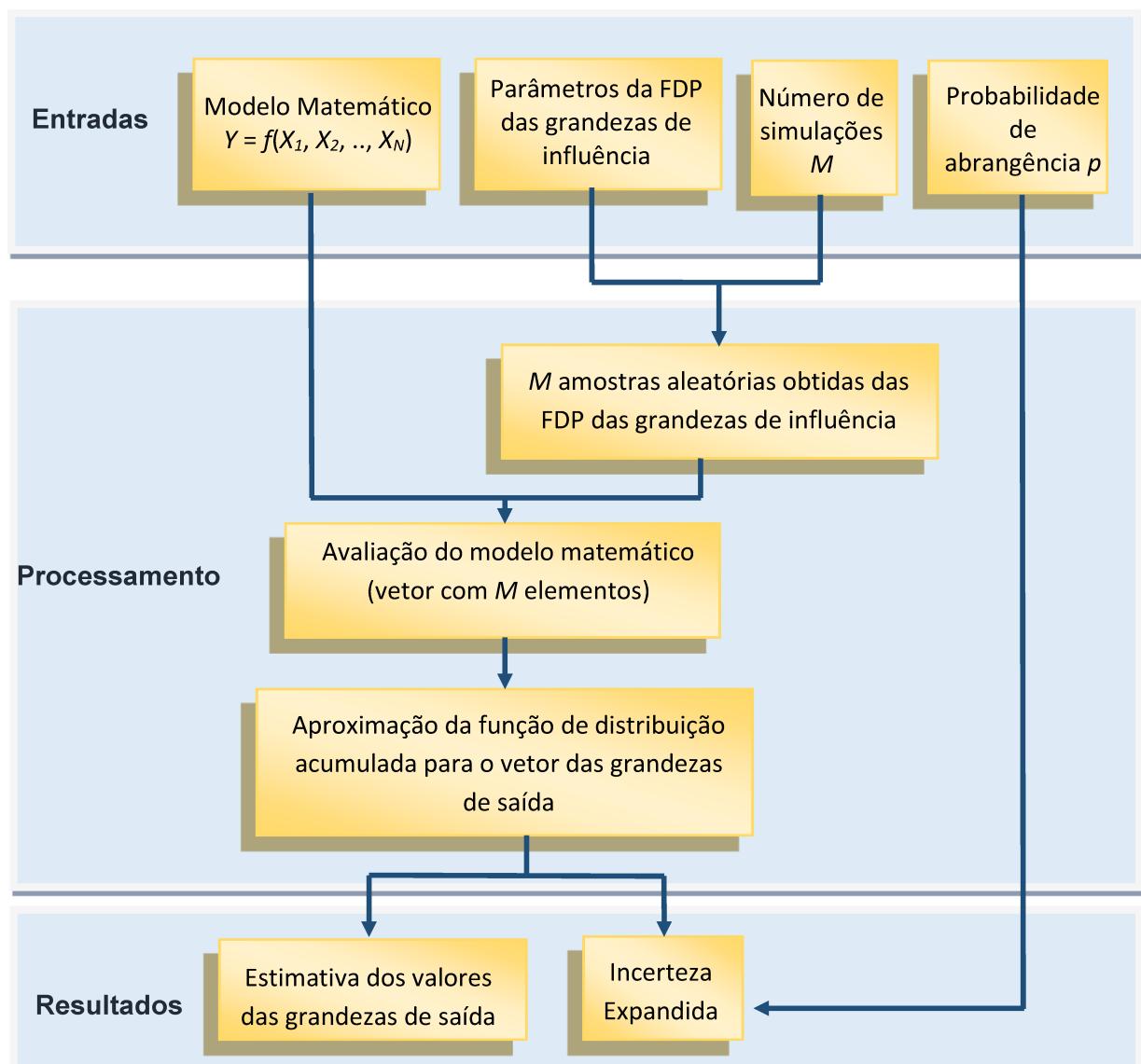


Figura 2.23 - Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição utilizando o MC, conforme JCGM 101 (BIPM et al., 2008).

2.5.1. Avaliação do modelo

O modelo matemático proposto é avaliado para cada um dos M valores retirados das FDP das X_i variáveis de entrada. Especificamente, devem-se denotar os M valores por x_1, \dots, x_M , onde a posição de número r , dada por x_r contém $x_{1,r}, \dots, x_{N,r}$, com $x_{i,r}$ retirado da FDP de X_i . Então, os valores do modelo são dados pela Eq. (2.20):

$$y_r = f(x_r), r = 1, \dots, M \quad (2.20)$$

2.5.2. Representação discreta da distribuição da função para a variável de saída

A representação discreta da distribuição da função da variável de saída Y pode ser obtida de acordo com o procedimento a seguir:

- Classificar os valores do modelo $y_r, r = 1, \dots, M$, fornecidos pelo Método de Monte Carlo em ordem crescente. Denotam-se os valores classificados do modelo por $y(r), r = 1, \dots, M$;
- Se necessário, fazer pequenas perturbações numéricas para qualquer valor replicado do modelo $y(r)$ de modo que o resultado do conjunto de $y(r), r = 1, \dots, M$, forme uma sequência estritamente crescente;
- Tomar a FDP da variável de saída como o conjunto $y(r), r = 1, \dots, M$.

A função $y(r)$, quando na forma de um histograma e com largura de classes adequada, forma uma distribuição de frequências que, quando normalizada para ter área unitária, fornece uma aproximação da FDP de Y . Este histograma pode ser útil auxiliando na compreensão da natureza da FDP, como na extensão da sua assimetria.

2.5.3. Estimativa da variável de saída e da incerteza padrão associada

A média da variável de saída y é dada pela Eq. (2.21), enquanto que o desvio-padrão $u(y)$ é determinado pela Eq. (2.22):

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r \quad (2.21)$$

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \bar{y})^2} \quad (2.22)$$

A média é considerada como uma estimativa y de Y e o desvio-padrão representa a incerteza-padrão $u(y)$ associada a y .

2.5.4. Intervalo de abrangência para a variável de saída

O intervalo de abrangência para Y pode ser determinado a partir da representação discreta da FDP. A seguir deve-se determinar o valor de q pela Eq. (2.23), onde p representa a probabilidade e M o número de iterações.

$$q = pM \quad (2.23)$$

A Equação (2.23) é válida apenas quando q for um número inteiro. Caso contrário, q é determinado pela Eq. (2.24).

$$q = pM + \frac{1}{2} \quad (2.24)$$

Assim, o intervalo definido por $[y_{inicial}, y_{final}]$ possui uma abrangência de 100%.

Existem vários *softwares* que podem ser usados para realizar a Simulação de Monte Carlo, dentre eles: @RISK, da Palidase, o Crystal Ball 2000, da Decisioneering, e o Mathematica. Outros autores preferem utilizar planilhas eletrônicas como a Microsoft Excel para a execução dos cálculos, dado sua maior “popularidade”. Dentre eles estão: Piratelli e Di Giacomo (2003) e Junqueira e Pamplona (2002).

2.6. Planejamento de experimentos

O planejamento de experimentos baseia-se em princípios estatísticos, possibilitando extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. A atividade estatística mais importante é o planejamento dos experimentos por meio dos quais dados devem ser obtidos. Quando isso não é feito da forma apropriada, o resultado muitas vezes é uma montanha de números estéreis, da qual estatístico algum conseguiria extrair quaisquer conclusões (NETO et al. 2001).

Em todas as áreas do conhecimento a utilização da estatística com as técnicas de planejamento de experimentos são imprescindíveis para a tomada de decisão visando avaliação de novos procedimentos ou a otimização de processos e produtos. A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura.

Segundo Montgomery (2001), um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propósitas nas variáveis de entrada (x_i) de um processo, a fim de se observar e identificar mudanças correspondentes na resposta (y). Cabe destacar que algumas das variáveis de entrada do processo x_1, x_2, \dots, x_p são controláveis, enquanto outras, z_1, z_2, \dots, z_q são não-controláveis. Algumas vezes, esses fatores não-controláveis são chamados de fatores de ruído.

2.6.1. Princípios básicos do planejamento de experimentos

Para que seja possível planejar de modo adequado a coleta de dados, princípios básicos do planejamento de experimentos como a réplica, a aleatorização e a formação de blocos devem ser entendidos.

O primeiro trata-se de repetições do experimento realizadas sob as mesmas condições experimentais, o que permite a obtenção do erro experimental. Os métodos estatísticos requerem que as observações, ou os erros, sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente. Assim, os experimentos, com suas réplicas, devem ser realizados de forma aleatória, de modo a garantir a distribuição equânime de todos os fatores não considerados. Por fim, a blocagem ou formação de blocos é uma técnica extremamente importante, utilizada industrialmente que tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos que perturbam o sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los (NETO et al, 2001).

2.6.2. Roteiro para a realização de um bom experimento

Para usar a abordagem estatística no planejamento e na análise de um experimento é necessário que as pessoas envolvidas na experimentação tenham, antecipadamente, uma ideia clara do que será estudado e da forma como os dados serão coletados. Também é recomendado que se tenha uma ideia qualitativa de como os dados serão analisados. 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 e conclusões e recomendações.

2.6.3. Análise de variância

É a técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de populações. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Em outras palavras, a análise de variância é utilizada quando se quer decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Portanto, essa análise parte do princípio que o acaso só produz pequenos desvios, sendo as grandes diferenças geradas por causas reais.

Os pressupostos básicos da análise de variância são: as amostras serem aleatórias e independentes, as populações terem distribuição normal e as variâncias populacionais serem iguais. Na prática, esses pressupostos não precisam ser todos rigorosamente satisfeitos. Os resultados são empiricamente verdadeiros sempre que as populações são aproximadamente normais (isto é, não muito assimétricas) e têm variâncias próximas.

A ANOVA utiliza basicamente duas ferramentas, a saber: 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 análise de variância são:

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

Assim sendo, calcula-se o p-valor que é uma estatística muito utilizada 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, assumindo verdadeira a hipótese nula. Se o p -valor for menor que o α , rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 e se pode inferir “com cautela” que há uma diferença sistemática atuando, o que explica em que existe diferença entre os valores amostrais. A rejeição de H_0 permite concluir que as médias diferem do ponto de vista estatístico. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, se conclui que não há evidências de diferenças significativas entre as médias, ao nível α de significância escolhido.

Por se tratar de um teste bastante difundido, inúmeros *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas possuem o procedimento para ser aplicado automaticamente. Neste trabalho utilizou-se o *software* Statistica 7.0

Para um conjunto 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 Eq. (2.25) e Eq. (2.26).

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.25)$$

$$s^2 = \frac{SQT}{GLT} \quad (2.26)$$

É possível desmembrar a variância s^2 a partir da soma de quadrados total (SQT) adicionando-se e subtraindo-se a média amostral da Eq. (2.25), pode-se demonstrar que as duas somas de quadrados resultam como nas Eq. (2.27) e Eq. (2.28) as quais representam os desvios dentro e entre as amostras.

$$SQ_{\text{dentro}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_l)^2 \quad (2.27)$$

$$SQ_{\text{entre}} = \sum_{i=1}^k (\bar{y}_l - \bar{y})^2 \quad (2.28)$$

Dividindo-se as somas de quadrados pelos respectivos números de graus de liberdade, se obtêm 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 pode ser 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.

A comparação de valores de quadrados médios é realizada 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 é a razão entre os quadrados médios, dada pela Eq. (2.29). 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 probabilidade de 95%).

$$F_{1,2} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (2.29)$$

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 válidos, é necessário que os dados apresentem distribuição normal e que as variâncias dentro das amostras sejam aproximadamente iguais.

Tabela 2.3 - 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}	$F = QM_{entre} / QMR$
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. Assim, 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 variável (ou variáveis) seja aleatória. 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).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Tendo como principal fator motivador para a realização da presente pesquisa a demanda da indústria brasileira em desenvolver-se no campo de conhecimento relativo ao brunimento flexível de cilindros em blocos de compressores herméticos, bem como os objetivos do trabalho expostos no Capítulo I, foram definidas as etapas experimentais da pesquisa.

Os experimentos têm como foco principal o aprimoramento do processo de brunimento flexível dos cilindros de blocos de compressores em ferro fundido. Para tanto se pretende identificar os valores mais apropriados para os parâmetros de corte (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta) de forma a obter a melhor relação custo-benefício, ou seja, conseguir uma adequada qualidade geométrica dos cilindros e possibilitar um aumento na vida útil e na eficiência do compressor.

Os experimentos foram divididos em quatro etapas, definidas da seguinte maneira: brunimento convencional, avaliação da rugosidade, cálculo da incerteza de medição e brunimento flexível. As etapas foram realizadas em 36 cilindros de blocos de compressores herméticos, inicialmente usinados pelo processo de brunimento convencional com a ferramenta precidor, operação esta efetuada pela EMBRACO. Todas as peças foram identificadas com números de 1 (um) a 36 permitindo assim a comparação dos resultados obtidos em cada etapa.

Neste trabalho, adicionalmente realizou-se o brunimento flexível dos cilindros, em um centro de usinagem CNC, utilizando uma ferramenta denominada de brunidor flexível que é composta por uma haste metálica e cerdas de nylon com lóbulos abrasivos nas pontas.

A avaliação da rugosidade do cilindro foi efetuada após ambas as operações de usinagem.

3.1. Brunimento convencional

O brunimento convencional foi efetuado em 36 cilindros de blocos de compressores herméticos, na planta brasileira da EMBRACO, cujos parâmetros de corte foram definidos pela empresa e são apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - 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

A execução da usinagem foi realizada em uma máquina brunidora vertical multifuso, do fabricante Gehring, utilizando um conjunto de três brunidores, sendo um de desbaste (120 mesh), um de semi-acabamento (270 mesh) e um de acabamento (600 mesh). Ainda, foram efetuados dois golpes em cada operação (FERNANDES, 2014).

Outras informações referentes ao processo de brunimento convencional são de sigilo da empresa e não podem ser informadas neste trabalho.

3.2. Avaliação da rugosidade do cilindro

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

Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente de $20,0 \pm 1,0$ °C, conforme recomendado pela ABNT NM-ISO 1 (ABNT, 1997). Durante os experimentos a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital 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. Tanto as peças quanto os dispositivos e sistemas de medição foram deixados doze horas à temperatura padrão para atingirem o equilíbrio térmico.

A medição da rugosidade foi executada utilizando um rugosímetro portátil Surtronic 3+, do fabricante Taylor Hobson, modelo 112/1590, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e um apalpador com ponta de diamante com raio de ponta de $2 \mu\text{m}$, Fig. 3.1.



Figura 3.1 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson.

Como o rugosímetro não estava calibrado foi necessário efetuar a calibração do mesmo. Para tanto foi utilizado um padrão de rugosidade do fabricante Mitutoyo, que possui valor nominal de R_a igual a $0,38 \mu\text{m}$ e certificado de calibração número 15218/11 (ANEXO II). A incerteza expandida é de 6% para k igual a 2,65 e probabilidade de abrangência de 95%.

Durante a calibração, o padrão de rugosidade e o rugosímetro foram posicionados no desempeno de granito do fabricante Mitutoyo, Fig. 3.2. Este possui dimensões de 1000 mm de comprimento e 1000 mm de largura. No certificado de calibração do desempeno número 06994/13 (ANEXO III), a incerteza expandida declarada é de $2,9 \mu\text{m}$ para k igual a 2,25 e probabilidade de abrangência de 95%.



Figura 3.2 - Padrão de rugosidade e rugosímetro posicionados no desempeno de granito para a realização da calibração do rugosímetro.

Foram realizadas dez medições em uma posição central do padrão de rugosidade, conforme o desenho mostrado na Fig. 3.3. A seguir, calculou-se a média aritmética e o desvio-padrão dos valores indicados. Foi determinado o erro sistemático ou tendência e a exatidão e precisão dos resultados foram avaliadas. Por fim, a incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro foi estimada conforme descrito no subcapítulo 3.3.



Figura 3.3 - Posição central adotada no padrão de rugosidade para a realização das medições.

Ao término do procedimento de calibração, elaborou-se o certificado de calibração do rugosímetro (APÊNDICE I), com nº 0001/2016 emitido pelo LMD. Este certificado declara uma incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro de $0,02 \mu\text{m}$ para k igual a 2,23 e probabilidade de abrangência de 95%.

Para avaliação da rugosidade do cilindro do bloco do compressor, foi adotado o comprimento de amostragem l_r de 0,8 mm, conforme recomenda a ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) e utilizado o filtro Gaussiano para retirada das ondulações do perfil.

A fim de minimizar o efeito da vibração mecânica transmitida pelo solo, o rugosímetro e o bloco foram posicionados sobre a mesa de medição da máquina de medir por coordenadas,

Fig. 3.4. A peça foi fixada na mesa utilizando um conjunto de dispositivos dedicados a este fim.



Figura 3.4 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson e bloco posicionados na mesa de desempeno da MMC.

A rugosidade de cada peça foi medida cinco vezes em quatro posições diferentes 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_{tp} (profundidade máxima do vale do perfil);
- R_t (Altura total do perfil);
- R_{sk} (fator de assimetria do perfil - *Skewness*);
- R_{ku} (fator de achatamento do perfil - *Kurtosis*);
- R_k (rugosidade do núcleo do perfil);
- R_{vk} (região de pico);
- R_{pk} (região de vale);
- V_o (volume de retenção de óleo);
- CV (coeficiente de vazio).

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

As posições adotadas pelo bloco do compressor durante a medição da rugosidade do cilindro foram determinadas como Posição 1 (Fig. 3.5a), Posição 2 (Fig. 3.5b), Posição 3 (Fig. 3.5c) e Posição 4 (Fig. 3.5d), respectivamente.

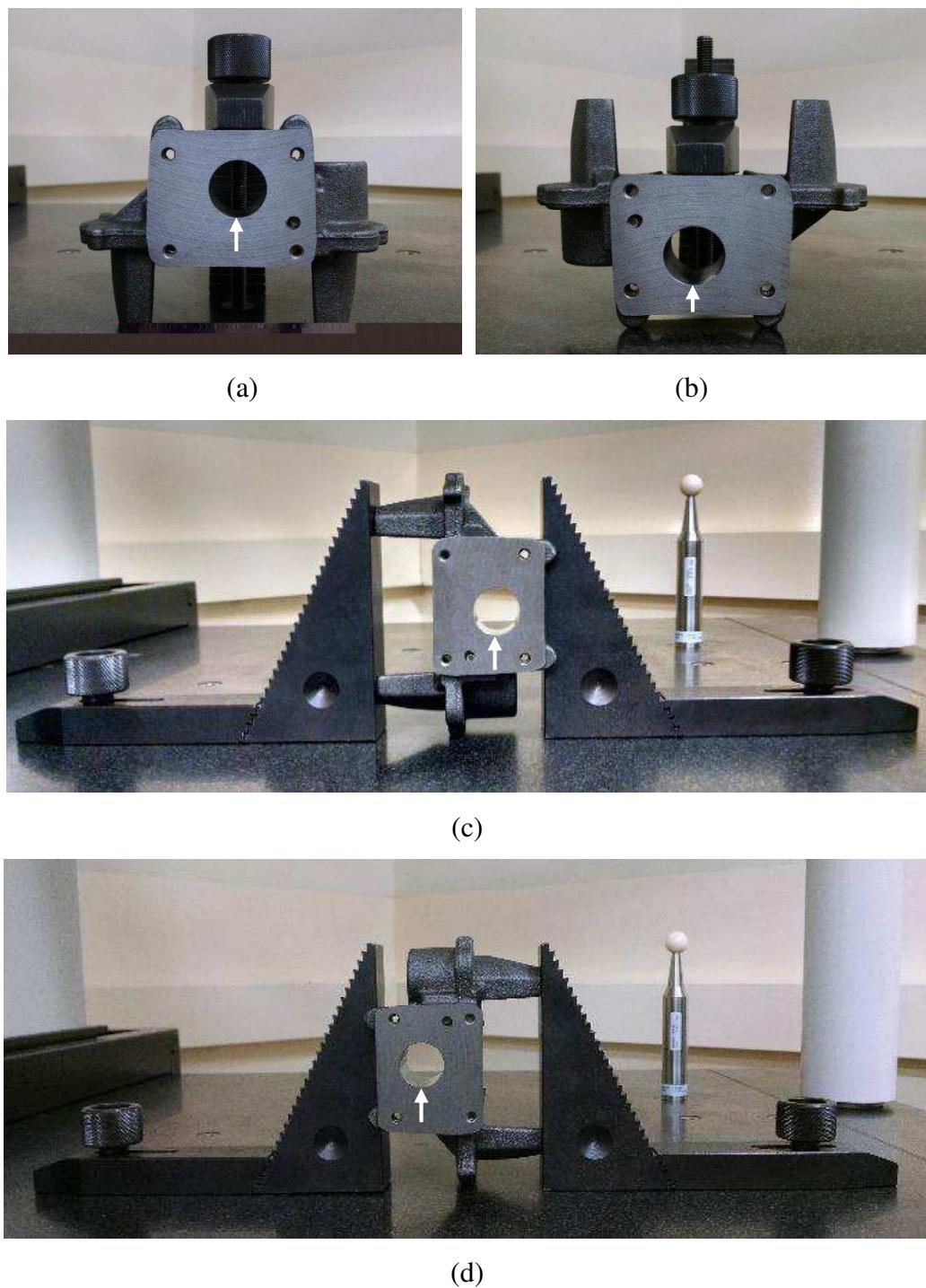


Figura 3.5 - Posições adotadas durante a medição da rugosidade do cilindro: (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3 e (d) Posição 4.

Para todas as posições adotadas do bloco do compressor, a medição da rugosidade do cilindro foi efetuada a uma distância de aproximadamente 20 mm da base do bloco do compressor hermético, conforme mostrado na Fig. 3.6.

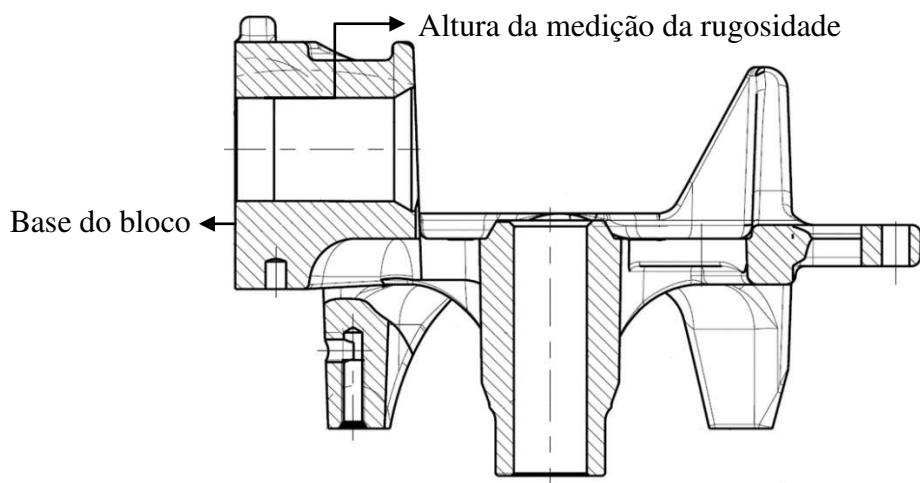


Figura 3.6 - Desenho do bloco do compressor hermético (EMBRACO, 2016).

A coleta dos dados foi realizada através do programa computacional *Talyprofile Gold* 4.0, fornecido pelo fabricante do respectivo rugosímetro, Fig. 3.7.

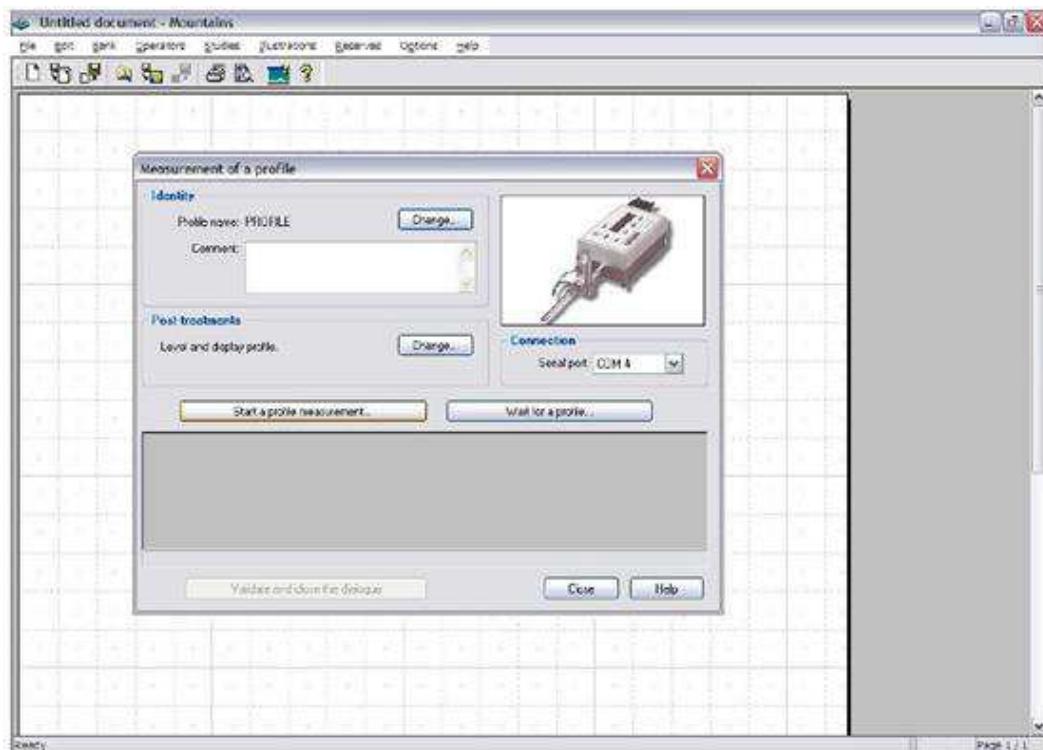


Figura 3.7 - Interface gráfica do programa computacional *Talyprofile Gold* 4.0.

3.3. Avaliação da incerteza de Medição

Com o intuito de contribuir para a rastreabilidade do resultado proveniente de uma medição, estimou-se a incerteza de medição para todos os mensurandos, sendo que para os parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , CV , Rk , Rpk , Rvk e Vo foi utilizado o método proposto no JCGM 100 (BIPM et al., 2008), enquanto para os parâmetros adimensionais Rsk e Rku foi aplicado o método de Monte Carlo (MC).

Os parâmetros de amplitude Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rsk , Rku são definidos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e são calculados a partir das equações apresentadas no Capítulo II. Já os parâmetros funcionais da família Rk , são definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone* e descritos pela norma ISO 13565-2 (ISO, 1996). As equações utilizadas para o cálculo destes parâmetros foram usadas como ponto de partida para avaliação da incerteza de medição e identificação das variáveis de influência.

Os parâmetros de amplitude podem ser influenciados na medição 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 e aos parâmetros Vo e a relação Rp/Rt (coeficiente de vazio CV).

A medição da rugosidade foi conduzida sob uma mesa de medição, condição que excluiu a variável amplitude da vibração mecânica (V), pois minimiza seus efeitos.

É importante destacar que 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 destas 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.

Estes pontos são definidos pelas coordenadas X e Z gerando um gráfico bidimensional de rugosidade (perfil efetivo). Para determinar o valor da coordenada X de cada um destes pontos, basta dividir o comprimento de avaliação pela quantidade total de pontos, enquanto

que o valor da ordenada Z pode ser obtido por meio de alguns programas computacionais dedicados a determinados tipos de rugosímetros.

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 considera-se que a incerteza associada à coordenada Z é igual para todos os pontos. 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 muito pequena para o nível de exatidão requerido durante a medição.

A Equação (3.1) apresenta o modelo matemático para o cálculo da incerteza associada à calibração do rugosímetro. Por sua vez a Eq. (3.2) é proposta para o cálculo da incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_v , R_t , R_k , R_{pk} , R_{vk} e V_o . Para o CV foi empregada a Eq. (3.3).

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

$$R_{Rug} = \bar{x}(L_{Rug}) + \Delta R_{Rug} + \Delta IC_{Rug} + \Delta A_R + \Delta D \quad (3.2)$$

$$CV = \bar{x}(L_{CV}) + \frac{\Delta R_p}{\Delta R_t} \quad (3.3)$$

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:

- $\bar{x}(L_{Rug})$: 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_{PR} : correção associada à incerteza da calibração do padrão de rugosidade;
- ΔIC_{Rug} : correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro;
- ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador;
- ΔD_{PR} : correção associada à deformação do padrão de rugosidade durante a medição;
- ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição;
- ΔR_p : correção associada à incerteza da medição do parâmetro R_p ;

- ΔR_t : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rt .

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas nas Eqs. (3.1) à (3.3), obtém-se as Eqs. (3.4) à (3.6), que permite calcular a incerteza-padrão combinada, conforme o método proposto no JCGM 100 (BIPM et al., 2008).

$$u_C^2(IC_{Rug}) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta IC_{PR}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta A_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta D_{PR}) \quad (3.4)$$

$$u_C^2(R_{Rug}) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta IC_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta A_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta D) \quad (3.5)$$

$$u_C^2(CV) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{CV})) + \left(\frac{1}{\Delta R_t} \right)^2 \cdot u^2(\Delta R_p) + \left(- \left(\frac{\Delta R_p}{\Delta R_t^2} \right) \right)^2 \cdot u^2(\Delta R_t) \quad (3.6)$$

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 da calibração do rugosímetro, na medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rk , Rpk , Rvk e Vo e na medição do coeficiente de vazio CV são apresentados nas Tabs. 3.2 à 3.4.

Nas Tabelas 3.2 a 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, $U(IC_{PR})$ é incerteza expandida da calibração do padrão de rugosidade, $U(IC_{Rug})$ é incerteza expandida da calibração do rugosímetro, k_{PR} é o fator de abrangência para o padrão de rugosidade, k_{Rug} é o fator de abrangência para o rugosímetro, $v_{efetivo(Rp)}$ é o grau de liberdade do parâmetro Rp e $v_{efetivo(Rt)}$ é o grau de liberdade do parâmetro Rt .

De acordo com Haitjema (1998) a parcela de contribuição da variável associada ao raio da ponta do apalpador é da ordem de 2% do valor do parâmetro de rugosidade avaliado (P), conforme mostrado no cálculo da incerteza-padrão da Tab. 3.2.

O valor da deformação experimentada pelo padrão de rugosidade (D_{PR}) durante a medição foi adotado como sendo 20 nm (LEACH, 2001). Já o valor da deformação experimentada pelo material do bloco do compressor (D) durante a medição, neste trabalho, foi adotado como sendo 5 nm.

Tabela 3.2 - 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 da calibração do rugosímetro.

Grandeza	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_{PR}	B	Normal	$u(IC_{PR}) = \frac{U(IC_{PR})}{k_{PR}}$	5	1
ΔA_R	B	Triangular	$u(A_R) = \frac{0,02 \cdot P}{\sqrt{6}}$	∞	1
ΔD_{PR}	B	Triangular	$u(D_{PR}) = \frac{D_{PR}}{\sqrt{6}}$	∞	1

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 Ra , Rq , Rp , Rt , Rvk , Rpk , Rk e Rvo .

Grandeza	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 .

Grandeza	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>	$u(\Delta R_t)$	$v_{efetivo(Rt)}$	$\frac{\Delta R_p}{\Delta R_t^2}$

3.3.1. Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Rsk e Rku

O cálculo desta incerteza, como dito anteriormente, foi realizado aplicando o MC (INMETRO, 2008).

Inicialmente, os primeiros passos para determinação da incerteza são idênticos ao do JCGM 100 (BIPM et al., 2008), como por exemplo, a identificação das variáveis de influência, definição do modelo matemático e adoção do tipo de distribuição. Em seguida iniciam-se as etapas para cálculo através do MC.

As Equações (3.7) e (3.8) apresentam os modelos matemáticos para os cálculos das incertezas associadas aos parâmetros Rsk e Rku , respectivamente.

$$Rsk = \bar{x}(L_{Rsk}) + \left(\frac{1}{(\Delta R_q)^3} \right) \cdot (\Delta Z)^3 \quad (3.7)$$

$$Rku = \bar{x}(L_{Rku}) + \left(\frac{1}{(\Delta R_q)^4} \right) \cdot (\Delta Z)^4 \quad (3.8)$$

Sendo Rsk o fator de assimetria do perfil - *Skewness* e Rku o fator de achatamento do perfil - *Kurtosis*. As variáveis de influência são:

- $\bar{x}(L_{Rsk})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rsk ;

- $\bar{x}(L_{Rku})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rku ;
- ΔRq : correção associada à incerteza da medição do parâmetro Rq ;
- ΔZ : correção associada à incerteza da medição da ordenada Z ;

3.3.1.1. Determinação do número de iterações para aplicação do MC

As simulações necessárias para aplicação do MC foram realizadas utilizando o Excel 2007 e como ponto de partida para sua execução foram efetuadas 100.000 iterações, tomando como referência os trabalhos desenvolvidos por Piratelli-Filho e Di Giacomo (2003), Costa (2012) e Leal (2013).

A fim de determinar o valor limite destas iterações, foram considerados os seguintes requisitos.

- Comportamento aproximadamente normal da FDP da variável de saída;
- Coeficiente de assimetria (*skewness*) próximo de zero;
- Coeficiente de achatamento (*Kurtosis*) próximo de 3;
- Estabilidade dos valores da incerteza padrão combinada.

3.3.1.2. Geração de números aleatórios

O Excel 2007 superou algumas das limitações das versões anteriores, tornando-o útil para geração de números aleatórios. Dentre outros aspectos destaca-se o número de linhas que de 60.000 passou para 1.000.000, sendo possível utilizá-lo em diversas aplicações.

Embora exista a possibilidade de gerar números aleatórios de forma rápida por meio de funções específicas, a quantidade de números gerados é limitada não sendo possível utilizar estas funções para aplicação do MC.

Com isto, torna-se necessário utilizar “funções” disponíveis no Excel (Tab. 3.5) para gerar os vetores com os valores correspondentes a cada variável de entrada. Portanto as distribuições de probabilidade consideradas foram às adotadas em cada caso.

Tabela 3.5 - Funções utilizadas para a simulação do MC (EXCEL, 2007).

Função	Finalidade
INV.NORM(ALEATÓRIO();\bar{x}; s)	Geração de números aleatórios considerando uma distribuição normal
ALEATÓRIO()	Geração de números aleatórios considerando uma distribuição retangular ou uniforme

No caso específico da função ALEATÓRIO () deve-se destacar que por meio desta, somente é possível gerar um número positivo entre zero e um. Impossibilitando a priori gerar o número no intervalo de interesse. Desta maneira, deve-se em primeiro lugar multiplicar esse número pela incerteza padrão da variável analisada e em um segundo momento deve-se efetuar uma perturbação para que os valores simulados fiquem com esperança igual a zero como recomendado pelo Suplemento 1 (BIPM, 2008).

Neste trabalho foi utilizada a Eq. (3.9) para efetuar esta perturbação.

$$valor = (ALEATORIO () \cdot u(x_i)) \cdot 2 - u(x_i) \quad (3.9)$$

3.3.1.3. *Obtenção dos valores do mensurando*

Concluída a simulação, os vetores relativos a cada variável foram substituídos nas equações correspondentes, obtendo-se assim o vetor dos valores da variável de saída ou mensurando. Em seguida foi elaborado um histograma com o intuito de verificar o comportamento da distribuição da variável de saída e seus parâmetros característicos.

3.3.1.4. *Obtenção da FDP do mensurando, o desvio padrão, os limites do intervalo de abrangência para um dado nível de confiança e a incerteza de medição*

Os valores do mensurando foram organizados em ordem crescente. Em seguida obteve-se a FDP do mensurando, identificados os limites inferior e superior do intervalo e calculado o coeficiente de assimetria (*skewness*). Por fim foi determinada a incerteza expandida como sendo duas vezes o desvio-padrão para $k = 2,00$ e uma probabilidade de abrangência de 95%, usualmente utilizada na maioria das aplicações da metrologia dimensional.

3.4. Brunimento flexível

A segunda operação 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. 3.8, cuja potência do motor principal é de 12,5 CV, com rotação máxima de 10000 rpm. Esta máquina apresenta cursos dos 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 3.8 - Centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2016).

Embora o processo de produção fabril seja realizado em uma máquina especial multifuso, a utilização de um centro de usinagem CNC reproduz satisfatoriamente as condições reais de operação. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão sintética com concentração de 5%, disponível na máquina.

Para realização do brunimento flexível foi utilizada um brunidor flexível, Fig. 3.9, que possui as seguintes especificações mostradas na Tab. 3.6. A ferramenta foi fixada por meio de um mandril tipo chave.

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

Composição	SiC e Ligante Resinóide
Granulometria	800 mesh
Diâmetro Nominal da Ferramenta	24,2 mm



Figura 3.9 - Brunidor flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria 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 a peça na máquina fresadora CNC. Para construção do mesmo foi utilizado 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 furação e fresamento.

O dispositivo possui três furos em sua superfície, um no centro com diâmetro igual a 40 mm, e dois posicionados em diagonal com diâmetro de 4 mm, Fig. 3.10a. O primeiro tem por objetivo escoar o fluido de corte enquanto os dois últimos foram utilizados para colocar dois pinos aonde o bloco é encaixado, Fig. 3.10b.

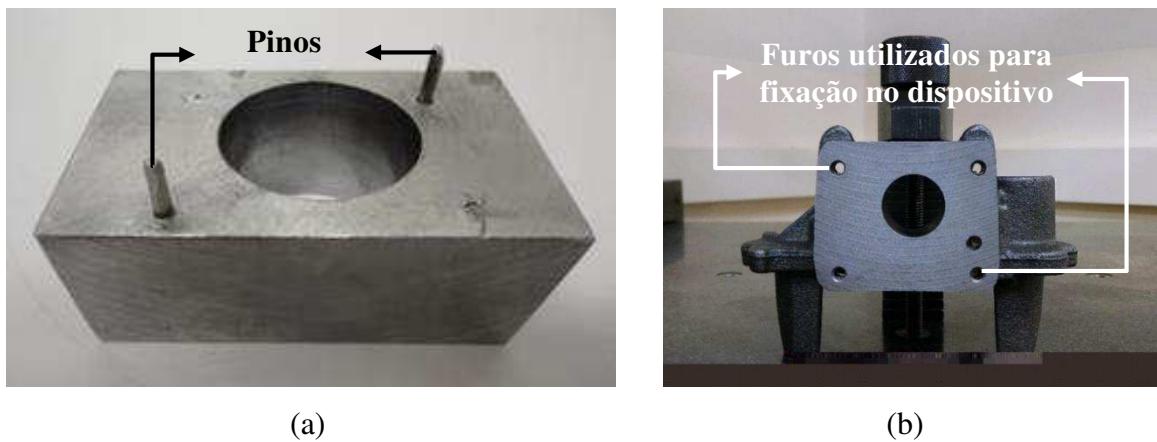


Figura 3.10 - (a) Dispositivo utilizado para fixação do bloco no centro de usinagem CNC durante a realização do brunimento flexível (FERNANDES, 2014) e (b) furos do bloco do compressor utilizados para fixação no dispositivo.

O dispositivo é fixado na máquina CNC através das castanhas, conforme a Fig. 3.11.

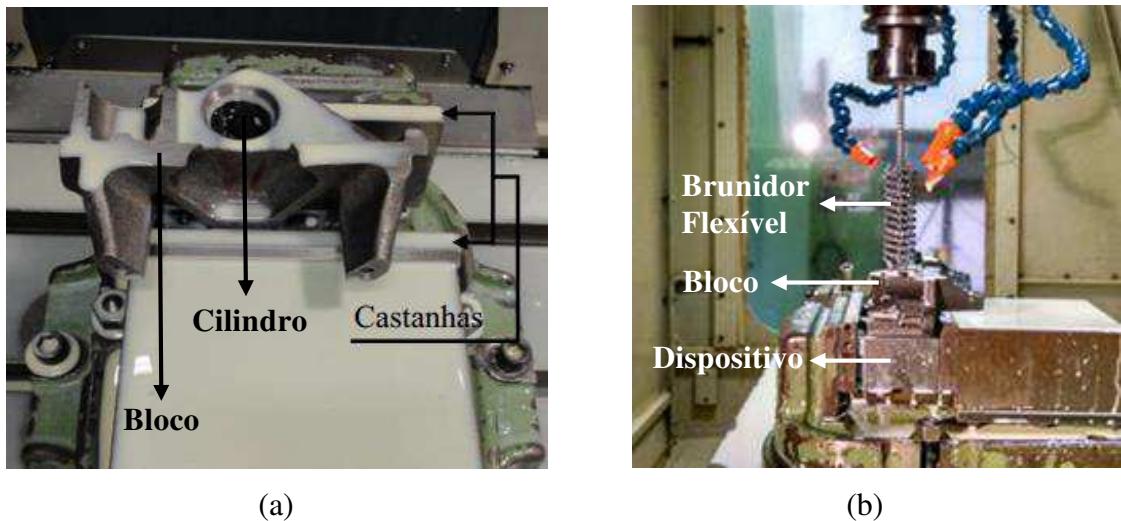


Figura 3.11 - Fixação do dispositivo na máquina CNC.

Para o alinhamento do brunidor flexível com o cilindro do bloco do compressor foi necessário a utilização de uma broca. Primeiramente, aproximou-se a broca na superfície do cilindro e, posteriormente, retornou esta à posição referente ao centro do cilindro (metade de seu diâmetro). Este procedimento foi viável visto que a ferramenta brunidora é auto-centrante.

3.5. Planejamento dos experimentos

Objetivando investigar o efeito das variáveis rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta no valor da rugosidade: Ra , Rq , Rp , Rv , Rt , Rsk , Rku , Rvk , Rpk , Rk , Vo e CV foi proposto uma planejamento fatorial completo $2 \times 2 \times 3$, totalizando 12 testes. Para cada teste foram feitas três réplicas.

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.

A Tabela 3.7 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial completo proposto.

Tabela 3.7 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo $2 \times 2 \times 3$.

Experimento	Fator 1 Rotação (rpm)	Fator 2 Velocidade de avanço (mm/min)	Fator 3 Número de golpes
1	-1 (400)	-1 (1400)	-1 (1)
2	+1 (700)	-1 (1400)	-1 (1)
3	-1 (400)	+1 (2800)	-1 (1)
4	+1 (700)	+1 (2800)	-1 (1)
5	-1 (400)	-1 (1400)	0 (2)
6	+1 (700)	-1 (1400)	0 (2)
7	-1 (400)	+1 (2800)	0 (2)
8	+1 (700)	+1 (2800)	0 (2)
9	-1 (400)	-1 (1400)	+1 (3)
10	+1 (700)	-1 (1400)	+1 (3)
11	-1 (400)	+1 (2800)	+1 (3)
12	+1 (700)	+1 (2800)	+1 (3)

Cada golpe da ferramenta no cilindro consiste 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. 3.12.

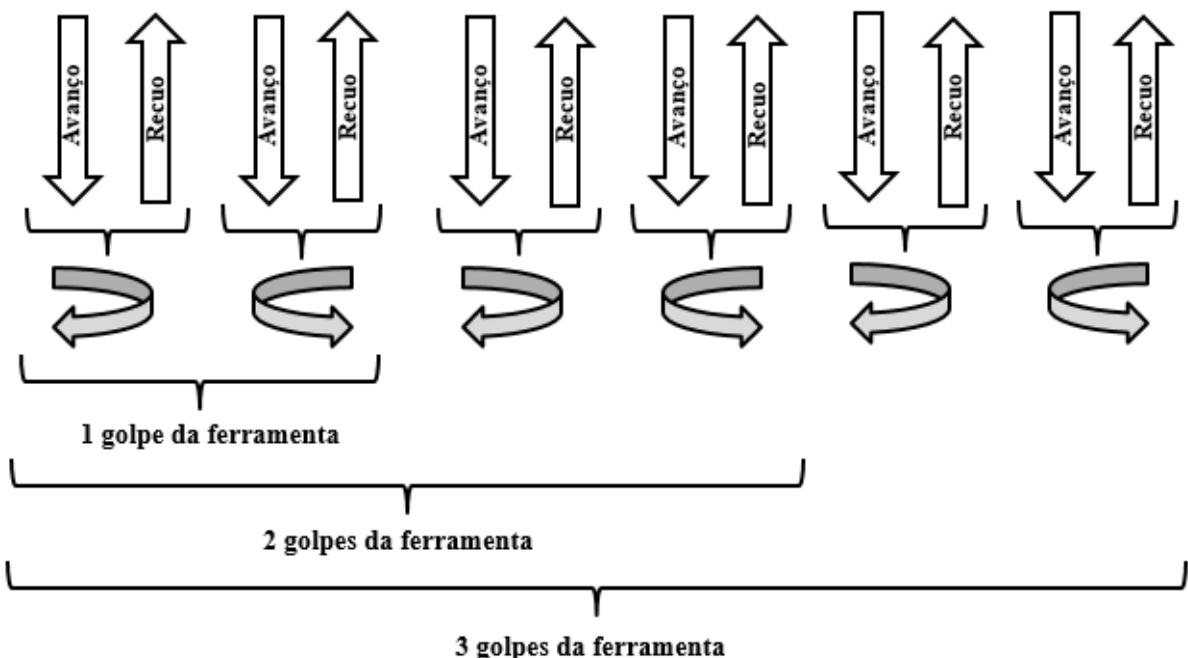


Figura 3.12 - Representação esquemática do número de golpes da ferramenta utilizados no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores.

O tratamento dos dados foi efetuado utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* Statistica 7.0. O objetivo desta técnica é identificar quais os fatores que produzem efeitos significativos nas variáveis de resposta, bem como identificar a relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e discutidos os resultados obtidos, os quais foram divididos em duas etapas: (1) calibração do rugosímetro eletromecânico e (2) rugosidade do cilindro. Em todos os casos é declarada a incerteza associada à medição.

4.1. Resultados da calibração do rugosímetro eletromecânico

A Tabela 4.1 mostra os valores obtidos durante a calibração do rugosímetro, bem como a média aritmética e o desvio-padrão para 68,27% de confiabilidade. Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio-padrão, uma vez que este é muito pequeno e se arredondado considerando os algarismos significativos da medição ele é igual a zero.

Tabela 4.1 - Valores das indicações, média aritmética e desvio-padrão obtidos durante a calibração do rugosímetro.

Leituras (μm)										Média (μm)	Desvio-padrão (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	0,005

O valor nominal do parâmetro Ra do padrão de rugosidade utilizado durante a calibração é de $0,38 \mu\text{m}$. Portanto, o erro sistemático ou tendência do rugosímetro calibrado é de $0,01 \mu\text{m}$. Desta forma, o rugosímetro apresenta uma tendência de fornecer valores de

rugosidade maiores que o real. Com relação à precisão, esta é igual a $\pm 0,01 \mu\text{m}$ em condições de repetibilidade, para uma confiabilidade de 95,45%.

Na Tabela 4.2 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95% de probabilidade de abrangência) para o parâmetro de rugosidade R_a . Verifica-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi à incerteza associada à calibração do padrão de rugosidade com 43,4%, seguida da incerteza associada ao raio da ponta do apalpador com 18,8%.

Tabela 4.2 - Resultados da avaliação da incerteza do R_a obtido durante a calibração. Em que: (TA) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,39	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,00149
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
$\Delta I_{C_{PR}}$	0,02	B	Normal	5	1	0,00736
ΔA_R	0,008	B	Triangular	∞	1	0,00318
ΔD_{PR}	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,00889 μm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						10
Fator de abrangência (k)						2,23
Incerteza expandida (U)						0,01981 μm

A incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro é declarada como sendo 0,02 μm , baseada em uma incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,23, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%. No APÊNDICE I é apresentado o certificado de calibração do rugosímetro que possui número 0001/2016 emitido pelo LMD.

4.2. Rugosidade do cilindro

A rugosidade do cilindro foi avaliada em quatro posições diferentes, entretanto os valores médios resultantes e o desvio-padrão associado foram similares para todas elas. Com

base nisso, para todos os parâmetros investigados, são apresentados somente os resultados obtidos na posição 1.

4.2.1. Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade do cilindro (R_a)

A Figura 4.1 mostra os valores médios de R_a dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE II, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

Os valores médios de R_a foram reduzidos após o brunimento flexível para todos os cilindros, Fig. 4.1. Uma comparação dos resultados mostra que os valores de R_a para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,14 μm até 0,21 μm , enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 0,08 μm e 0,15 μm . Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade R_a entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 23,9% e 54,7%, respectivamente. Observa-se, ainda, que a repetibilidade é maior para os cilindros brunidos com os mesmos parâmetros de corte, pois apresentam uma menor dispersão quando comparados com os valores médios após o brunimento convencional. Ou seja, a repetibilidade mostrou-se dependente das condições de usinagem. Por exemplo, no experimento 1, observou-se uma menor dispersão dos valores quando comparados com os resultados obtidos nos experimentos 3 e 4.

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro R_a , nota-se na Fig. 4.1 que foram similares após ambos os processos de brunimento e as barras de erros encontram-se parcialmente superpostas apenas para os cilindros 17 (experimento 3), 4 e 20 (experimento 4). A pouca variabilidade dos valores de incerteza pode ser justificada pelo comportamento do desvio-padrão amostral.

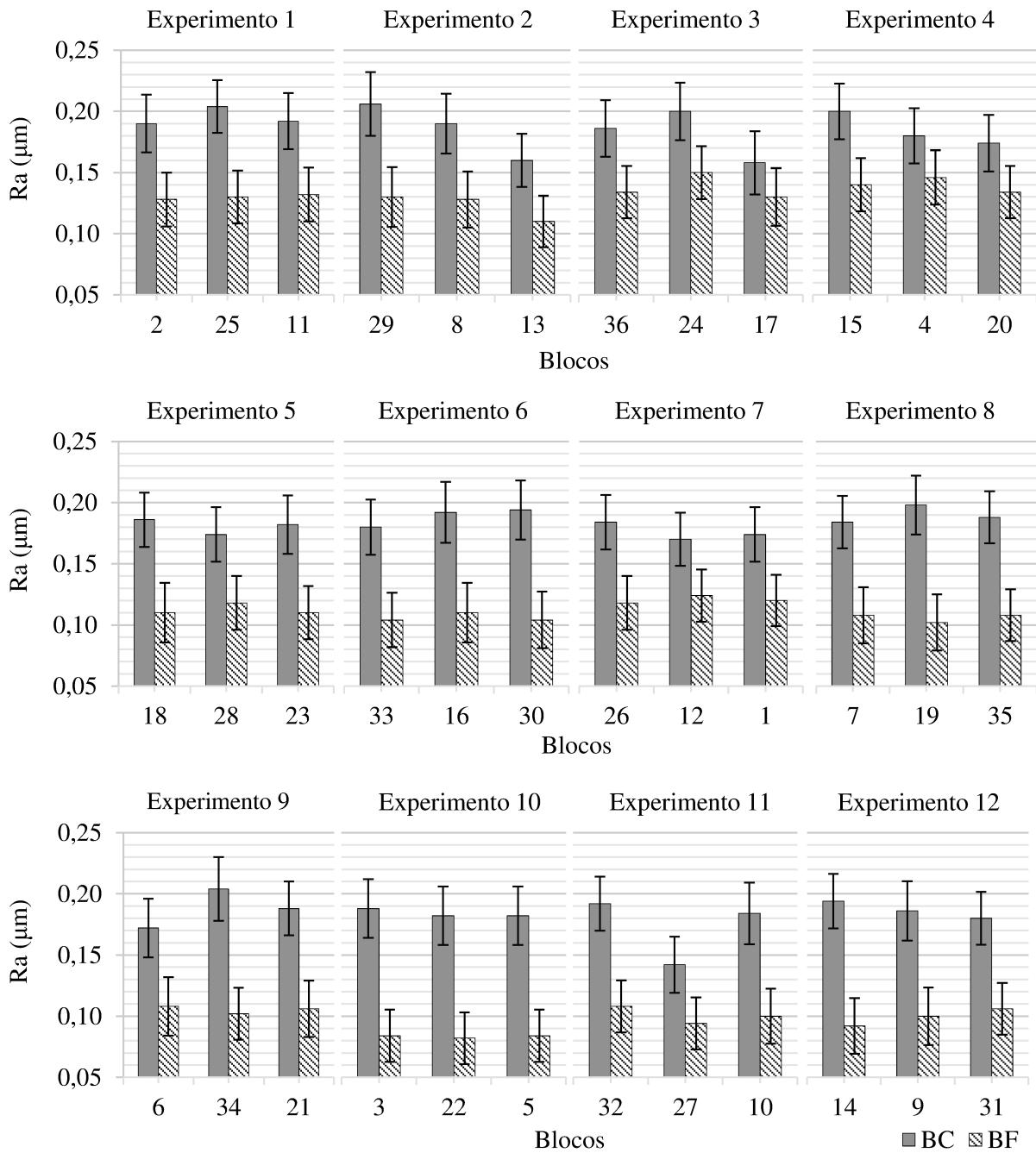


Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro Ra para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Ra para o cilindro do bloco 22 (experimento 10) usinado pelo brunimento flexível. Para os demais blocos os resultados são similares e, portanto não são aqui apresentados.

Tabela 4.3 - Resultados da avaliação da incerteza do Ra para o cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,08	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,00200
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	0,00067
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,00987
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						14
Fator de abrangência (k)						2,14
Incerteza expandida (U) em μm						0,02117

A incerteza-padrão associada à calibração do rugosímetro é a variável que mais contribuiu para a incerteza final e representa 82,6% da incerteza-padrão combinada. Por sua vez, a resolução do rugosímetro teve uma contribuição na incerteza final da ordem de 8,6%.

A incerteza expandida para a rugosidade Ra do cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,03 μm , baseada em uma incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,14, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.2 são apresentados os valores médios do parâmetro Ra para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 10 apresentaram os menores valores de Ra . Os parâmetros de usinagem utilizados no brunimento flexível destes cilindros foram: rotação de 700 rpm, velocidade de avanço de 1400 mm/min e 3 golpes da ferramenta. Já os cilindros do experimento 4 mostraram os maiores valores de Ra , sendo que os mesmos foram usinados com uma rotação de 700 rpm, velocidade de avanço de 2800 mm/min e 1 golpe da ferramenta.

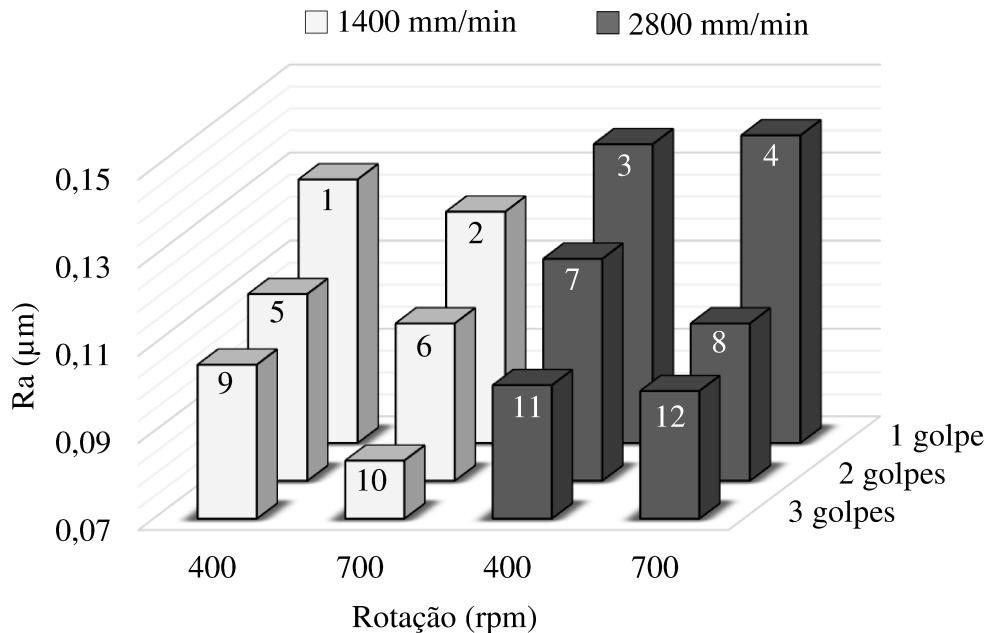


Figura 4.2 - Valores médios do parâmetro Ra para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Ra é apresentado na Tab. 4.4. Para que os parâmetros de usinagem produzam efeitos significativos na rugosidade Ra , estes devem apresentar um valor de probabilidade de significância (p) menor que 0,05 (nível de significância de 5%). Na tabela tem-se que: NG é número de golpes da ferramenta, VA é a velocidade de avanço, ROT é a rotação, $NG \times VA$ é a interação entre o número de golpes e a velocidade de avanço, $NG \times ROT$ é a interação entre o número de golpes e a rotação e $VA \times ROT$ é a interação entre a velocidade de avanço e a rotação.

Tabela 4.4 - ANOVA do parâmetro Ra de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,007562	1	0,007562	167,3398	0,000000	-0,035500
VA	0,000499	1	0,000499	11,0382	0,002494	0,007444
ROT	0,000625	1	0,000625	13,8316	0,000888	-0,008333
NG x VA	0,000074	1	0,000074	1,6266	0,212656	-0,003500
NG x ROT	0,000122	1	0,000122	2,6889	0,112241	-0,004500
VA x ROT	0,000121	1	0,000121	2,6778	0,112950	0,003667
Erro	0,001265	28	0,000045			

De acordo com a Tab. 4.4, os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA) e rotação (ROT), utilizados no brunimento flexível dos cilindros, produziram efeitos significativos na variável resposta Ra . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação e da velocidade de avanço da ferramenta.

O aumento no número de golpes da ferramenta reduziu a rugosidade Ra , conforme observado na Fig. 4.2. Um maior número de golpes proporciona maior tempo de contato dos glóbulos abrasivos do brunidor flexível com a superfície do cilindro, ocasionando maior remoção de microcavacos, e, consequentemente, promovendo a quebra dos picos com maior eficiência.

A rugosidade Ra também apresentou uma redução com o aumento da rotação da ferramenta. Um acréscimo na rotação proporciona maior remoção de microcavacos, na unidade de tempo e, consequentemente, a diminuição mais acentuada da altura dos picos do perfil.

Já a redução da velocidade de avanço da ferramenta ocasionou pequena diminuição na rugosidade Ra . Uma menor velocidade de avanço leva a um maior tempo de contato dos glóbulos abrasivos com a superfície do cilindro (50%), removendo maiores quantidades de microcavacos, e, consequentemente, reduzindo a altura dos picos do perfil.

Cabe ressaltar que para peças brunidas o parâmetro Ra não deve ser avaliado isoladamente, uma vez que por ser uma rugosidade média não caracteriza de forma adequada este tipo de superfícies, pois não diferencia picos de vales e pode ocultar a presença destes quando aparecem de forma isolada no perfil de rugosidade.

4.2.2. Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade (Rq)

A Figura 4.3 mostra os valores médios de Rq dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE III, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

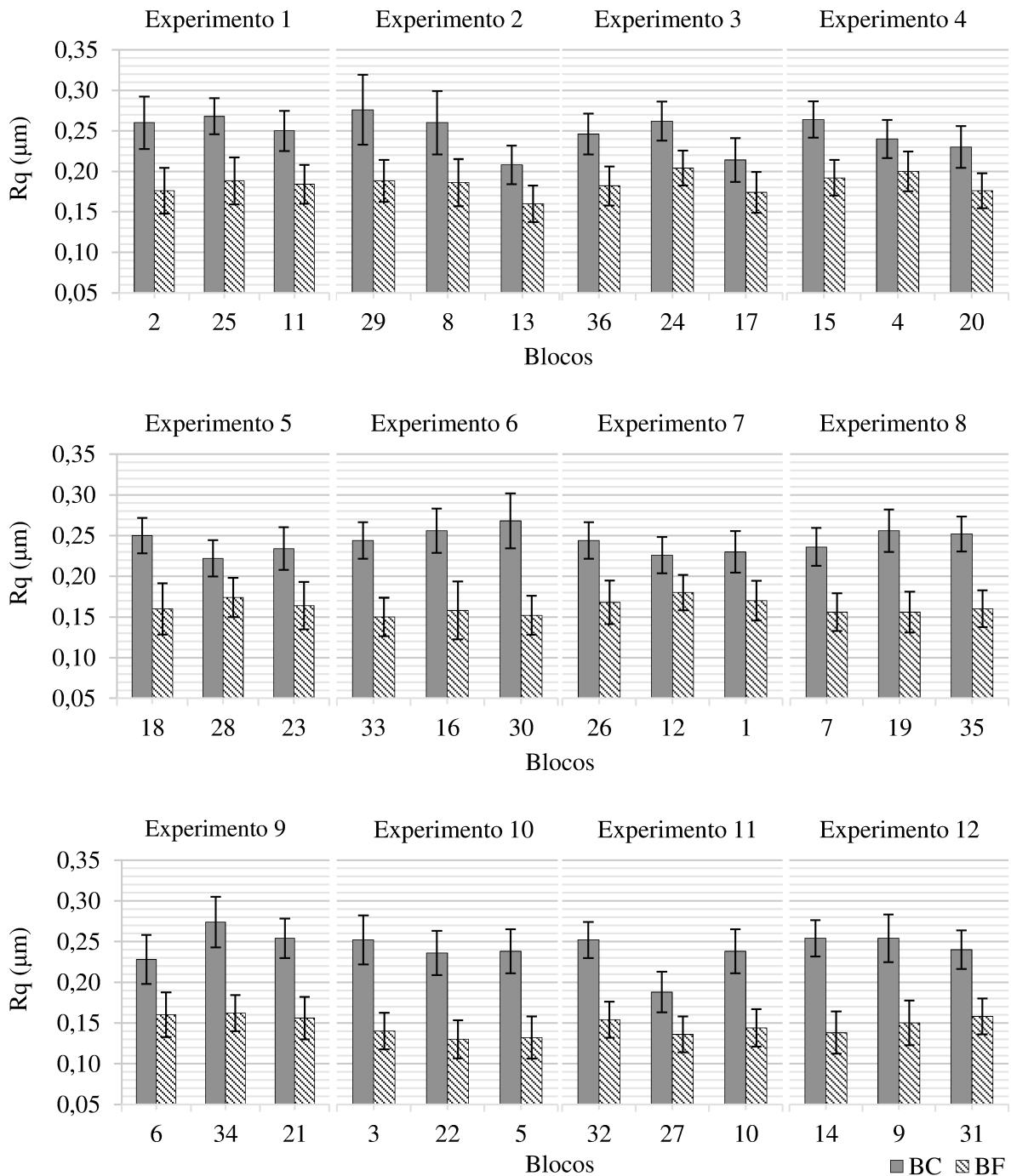


Figura 4.3 - Valores médios do parâmetro Rq para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Na Figura 4.3, os valores médios de Rq são menores após o brunimento flexível para todos os cilindros, sendo que para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,19 μm até 0,28 μm , enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 0,13 μm e 0,20 μm .

Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rq entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 22,4% e 44,6%, respectivamente. Nota-se que a repetibilidade dos valores de Rq é dependente das condições de usinagem, similar ao verificado na análise da rugosidade Ra . Nos experimentos 2 e 6 observam-se menores dispersões dos valores médios após o brunimento flexível, quando comparados com os resultados obtidos nos experimentos 3 e 4.

Os valores de incerteza expandida associados ao parâmetro Rq , presentes na Fig. 4.3, são similares para a maioria dos cilindros após ambos os processos de brunimento, devido à pequena variabilidade das leituras. As barras de erros encontram-se parcialmente superpostas apenas para os blocos 17 (experimento 3) e 4 (experimento 4).

Na Tabela 4.5 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rq para o cilindro do bloco 30 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à calibração do rugosímetro e representa 62,6% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à variabilidade das leituras com 26,5%. Isto foi verificado para a maioria dos cilindros, com exceção dos blocos 2, 29, 8, 30, 6, 34, 3 e 9 após o brunimento convencional e dos blocos 25, 8, 18, 23 e 16 após o brunimento flexível, nos quais a incerteza associada à variabilidade das leituras foi a variável de maior contribuição.

Tabela 4.5 - Resultados da avaliação da incerteza do Rq para o cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível.

De acordo com a Tab. 4.5, a incerteza expandida para a rugosidade Rq do cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo $0,03 \mu\text{m}$, baseada em uma incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,11, com distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.4 são apresentados os valores médios de Rq para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 10 mostraram os menores valores de Rq e os cilindros do experimento 4 os maiores valores. Este resultado está de acordo com o observado para o Ra .

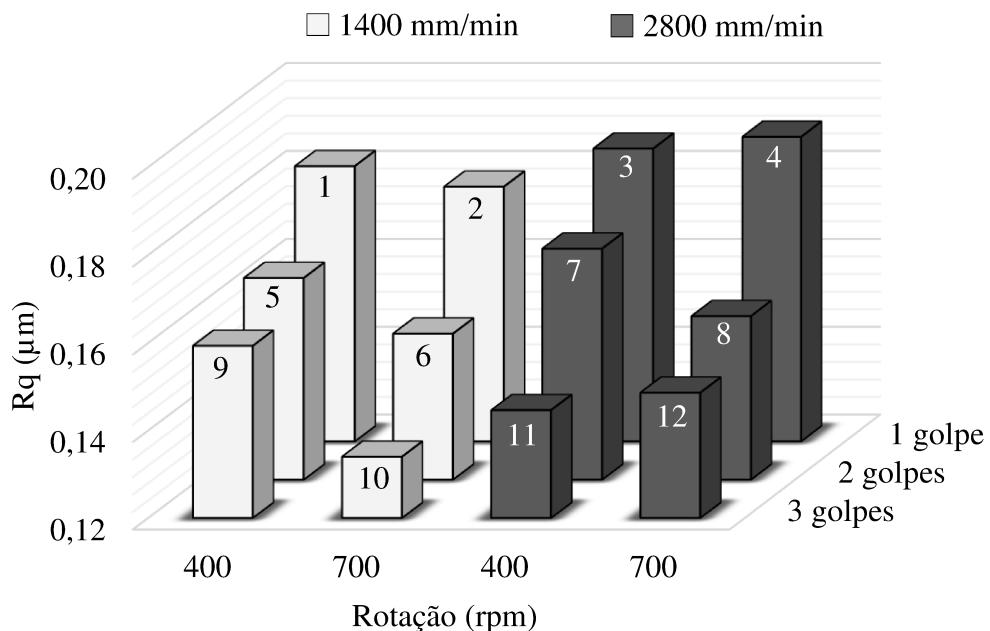


Figura 4.4 - Valores médios do parâmetro Rq para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rq é apresentado na Tab. 4.6. Os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG) e rotação (ROT) produziram efeitos significativos nos valores de Rq . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação da ferramenta.

Tabela 4.6 - ANOVA do parâmetro Rq de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,008437	1	0,008437	92,43360	0,000000	-0,037500
VA	0,000169	1	0,000169	1,85141	0,184472	0,004333
ROT	0,000659	1	0,000659	7,21697	0,012008	-0,008556
NG x VA	0,000088	1	0,000088	0,96587	0,334128	-0,003833
NG x ROT	0,000140	1	0,000140	1,53554	0,225570	-0,004833
VA x ROT	0,000289	1	0,000289	3,16602	0,086044	0,005667
Erro	0,002556	28	0,000091			

O aumento no número de golpes e na rotação da ferramenta proporcionou uma redução dos valores médios de Rq , uma vez que provoca uma maior redução da altura dos picos do perfil.

Diferentemente do observado para o Ra , a velocidade de avanço da ferramenta não afetou a rugosidade Rq . Isto pode ser explicado pela baixa repetibilidade dos valores médios de Rq para os cilindros brunidos com os mesmos parâmetros de corte (experimentos 3, 4, 7, 11 e 12). Estes cilindros foram usinados com velocidade de avanço de 2800 mm/min e apresentaram uma baixa repetibilidade quando comparados com outros experimentos, influenciando para que a velocidade de avanço da ferramenta não seja significativa.

Como analisado para o parâmetro Ra , as peças brunidas não devem ser avaliadas pelo parâmetro Rq isoladamente, uma vez que por ser uma rugosidade média não caracteriza de forma adequada este tipo de superfícies, apesar de ser mais sensível aos picos e vales isolados por elevar as ordenadas dos pontos do perfil ao quadrado.

4.2.3. Altura máxima do pico do perfil de rugosidade (Rp)

A Figura 4.5 mostra os valores médios de Rp dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE IV, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

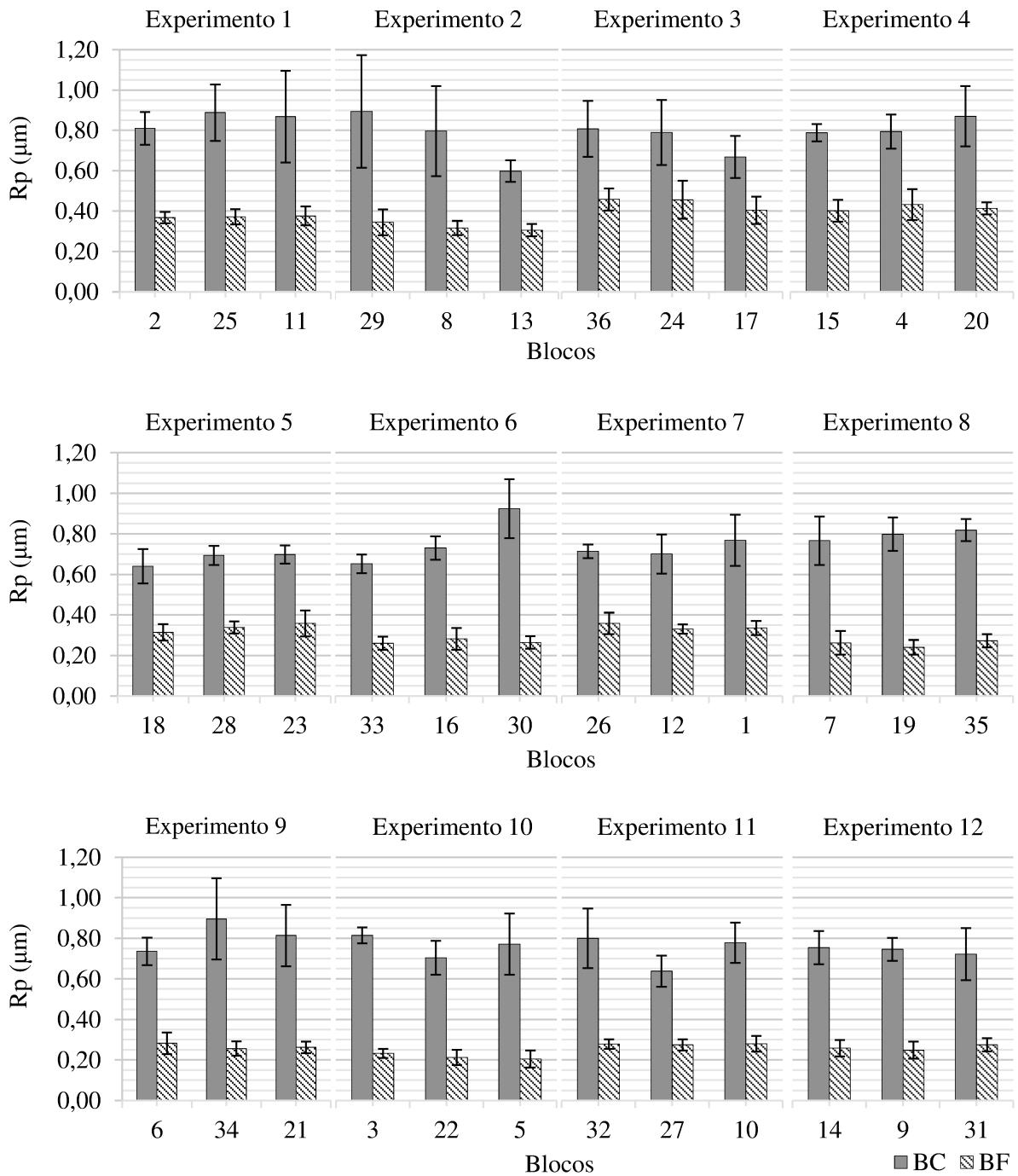


Figura 4.5 - Valores médios do parâmetro R_p para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A partir da Fig. 4.5, observa-se que os valores médios de R_p sofreram uma redução significativa após o brunimento flexível para todos os cilindros. Uma comparação dos resultados mostra que os valores de R_p para o brunimento convencional estão no intervalo de

0,60 μm até 0,92 μm , enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 0,20 μm e 0,46 μm . Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade R_p entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 41,8% e 71,7%, respectivamente. Este efeito é provocado pela redução da altura dos picos do perfil de rugosidade durante a usinagem dos cilindros.

A Figura 4.6 apresenta dois perfis efetivos referentes ao cilindro do bloco 13 para a medição 5 e usinado pelo brunimento convencional (Fig. 4.6a) e flexível (Fig. 4.6b).

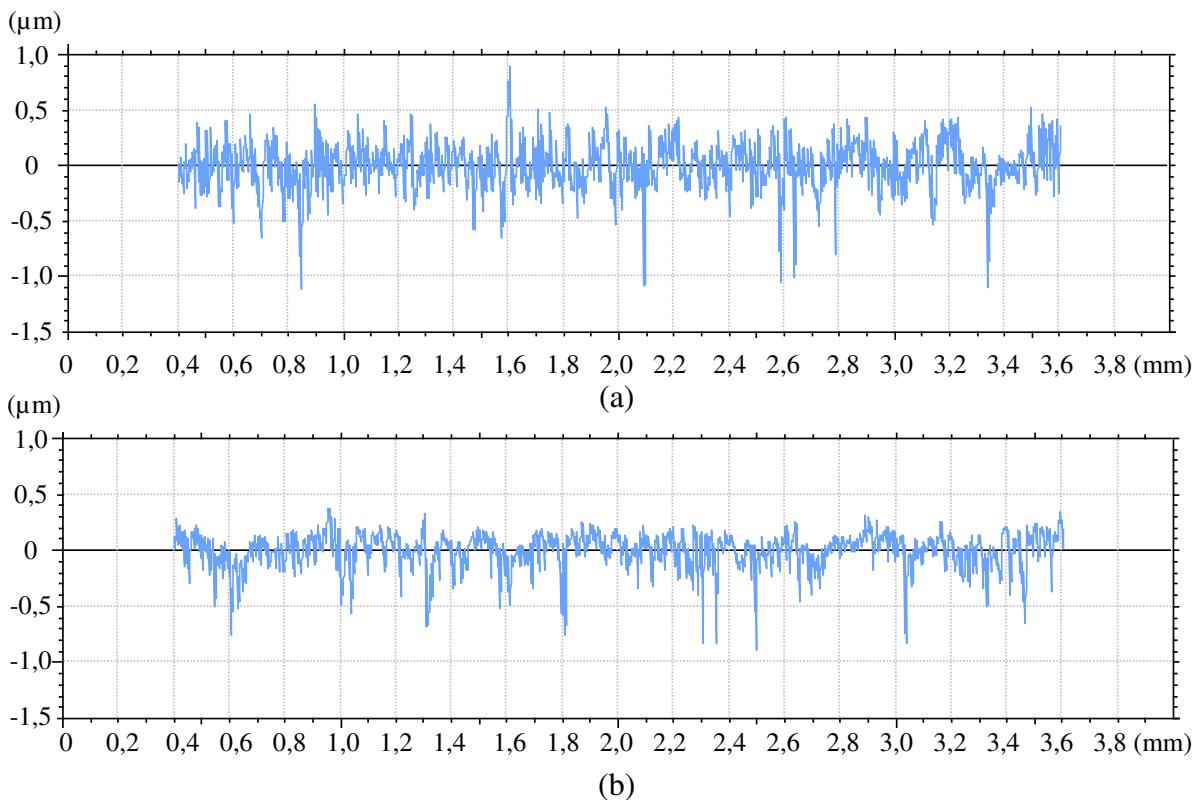


Figura 4.6 - Perfis efetivos referente ao cilindro do bloco 13 para a medição 5 na posição 1 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento flexível.

A Figura 4.6a exibe picos e vales estreitos e isolados no perfil de rugosidade com valores de altura e profundidade máximas de aproximadamente 0,9 μm e 1,1 μm , respectivamente. Comparando-se este perfil com aquele mostrado na Fig. 4.6b, brunido com rotação de 700 rpm, velocidade de corte de 1400 mm/min e 1 golpe da ferramenta, verifica-se que os picos isolados foram removidos e a altura média reduzida, apresentando valor máximo de aproximadamente 0,4 μm . Já os vales permaneceram com valores de profundidade praticamente inalterados.

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro R_p , observa-se na Fig. 4.5 que estes foram menores para os cilindros usinados após o brunimento flexível, com exceção dos blocos 15 (experimento 4), 23 (experimento 5) e 26 (experimento 7), seguindo a tendência do desvio-padrão experimental. Os valores da incerteza estão entre 0,04 μm e 0,28 μm após o brunimento convencional e entre 0,03 μm e 0,10 μm após o brunimento flexível. A repetibilidade é maior para os cilindros usinados com os mesmos parâmetros de corte, ou seja, os valores médios de R_p apresentaram menor dispersão para todos os experimentos após o brunimento flexível.

Na Tabela 4.7 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade R_p para o cilindro do bloco 13 (experimento 2) usinado pelo brunimento flexível.

Tabela 4.7 - Resultados da avaliação da incerteza do R_p para o cilindro 13 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezza	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,31	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,00980
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
$\Delta I C_{Rug}$	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,006	B	Triangular	∞	1	0,00250
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,01397
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						12
Fator de abrangência (k)						2,18
Incerteza expandida (U) em μm						0,03044

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 49,2% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à calibração do rugosímetro com 41,2%. Isto foi verificado para a maioria dos cilindros, com exceção dos blocos 2, 12, 3, 32 e 27 usinados pelo brunimento flexível, nos quais a incerteza associada à calibração do rugosímetro foi a variável de maior contribuição.

A incerteza expandida para a rugosidade R_p do cilindro 13 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,03 μm , baseada em uma incerteza-padrão combinada

multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,18, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.7 são apresentados os valores médios de Rp para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

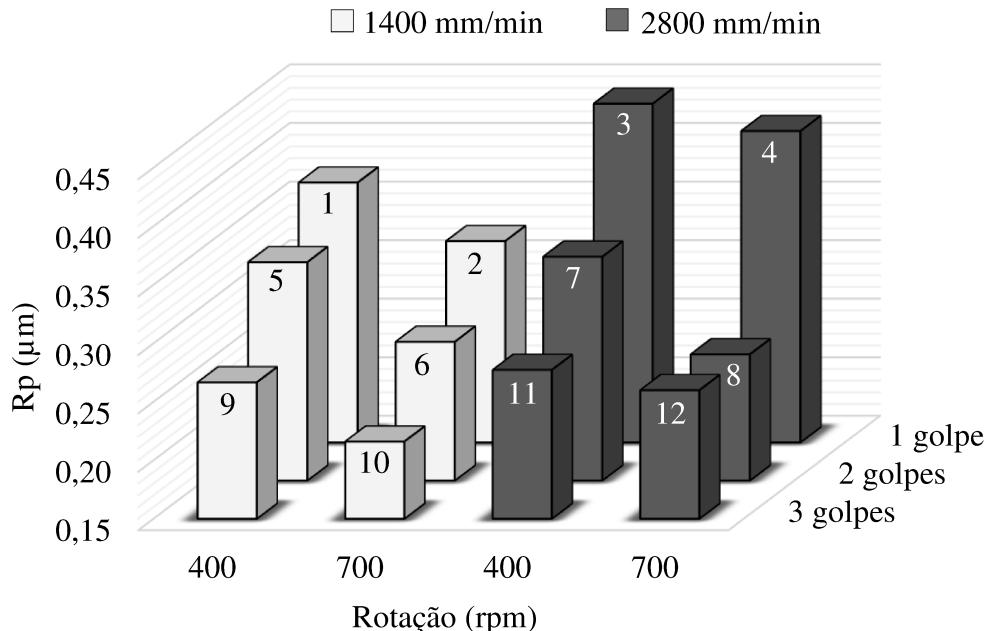


Figura 4.7 - Valores médios do parâmetro Rp para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

Verifica-se na Fig. 4.7, que os cilindros do experimento 10 apresentaram os menores valores de Rp (rotação de 700 rpm, velocidade de avanço de 1400 mm/min e 3 golpes da ferramenta) seguindo a tendência observada para os parâmetros de amplitude avaliados, Ra e Rq . Já os cilindros do experimento 3 mostraram os maiores valores de Rp (rotação de 400 rpm, velocidade de avanço de 2800 mm/min e 1 golpe da ferramenta).

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rp é apresentado na Tab. 4.8. Os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA), rotação (ROT) e a interação entre número de golpes e velocidade de avanço ($NG \times VA$), utilizados no brunimento flexível dos cilindros, produziram efeitos estatisticamente significativos na variável resposta Rp . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação, da velocidade de avanço da ferramenta e da interação $NG \times VA$.

Tabela 4.8 - ANOVA do parâmetro Rp de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,105073	1	0,105073	170,0620	0,000000	-0,132333
VA	0,011025	1	0,011025	17,8442	0,000230	0,035000
ROT	0,021413	1	0,021413	34,6580	0,000002	-0,048778
NG x VA	0,004267	1	0,004267	6,9057	0,013787	-0,026667
NG x ROT	0,000011	1	0,000011	0,0173	0,896404	0,001333
VA x ROT	0,000499	1	0,000499	0,8073	0,376587	0,007444
Erro	0,017300	28	0,000618			

O aumento no número de golpes da ferramenta proporcionou uma redução da rugosidade Rp . Na Figura 4.8 são apresentados três perfis efetivos referentes aos cilindros do bloco 13 para a medição 5 (Fig. 4.8a), do bloco 30 para a medição 2 (Fig. 4.8b) e do bloco 22 para a medição 1 (Fig. 4.8c). Estes três cilindros foram brunidos com os mesmos parâmetros de usinagem, com exceção do número de golpes da ferramenta. Comparando-se os perfis, nota-se que a altura média dos picos foi reduzida a medida que aumentou o número de golpes, apresentando valor máximo de aproximadamente 0,4 μm para o perfil da Fig. 4.8a, 0,3 μm para o perfil da Fig. 4.8b e 0,2 μm para o perfil da Fig. 4.8c.

A rugosidade Rp também apresentou uma redução com o aumento da rotação da ferramenta e com a diminuição da velocidade de avanço, conforme observado para o parâmetro Ra . No entanto, os efeitos destas condições de corte foram maiores no Rp , pelo motivo deste parâmetro indicar a altura máxima do pico do perfil no comprimento de amostragem, que é reduzida conforme o cilindro é usinado pelo brunidor flexível.

Já a interação número de golpes e velocidade de avanço da ferramenta proporcionou uma diminuição na rugosidade Rp . Entretanto, esta interação produziu menor efeito do que os fatores de controle avaliados isoladamente, Tab. 4.8.

Para os cilindros de compressores herméticos é desejável que o parâmetro Rp seja o menor possível, uma vez que os picos isolados presentes na superfície 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 aumentando sua eficiência.

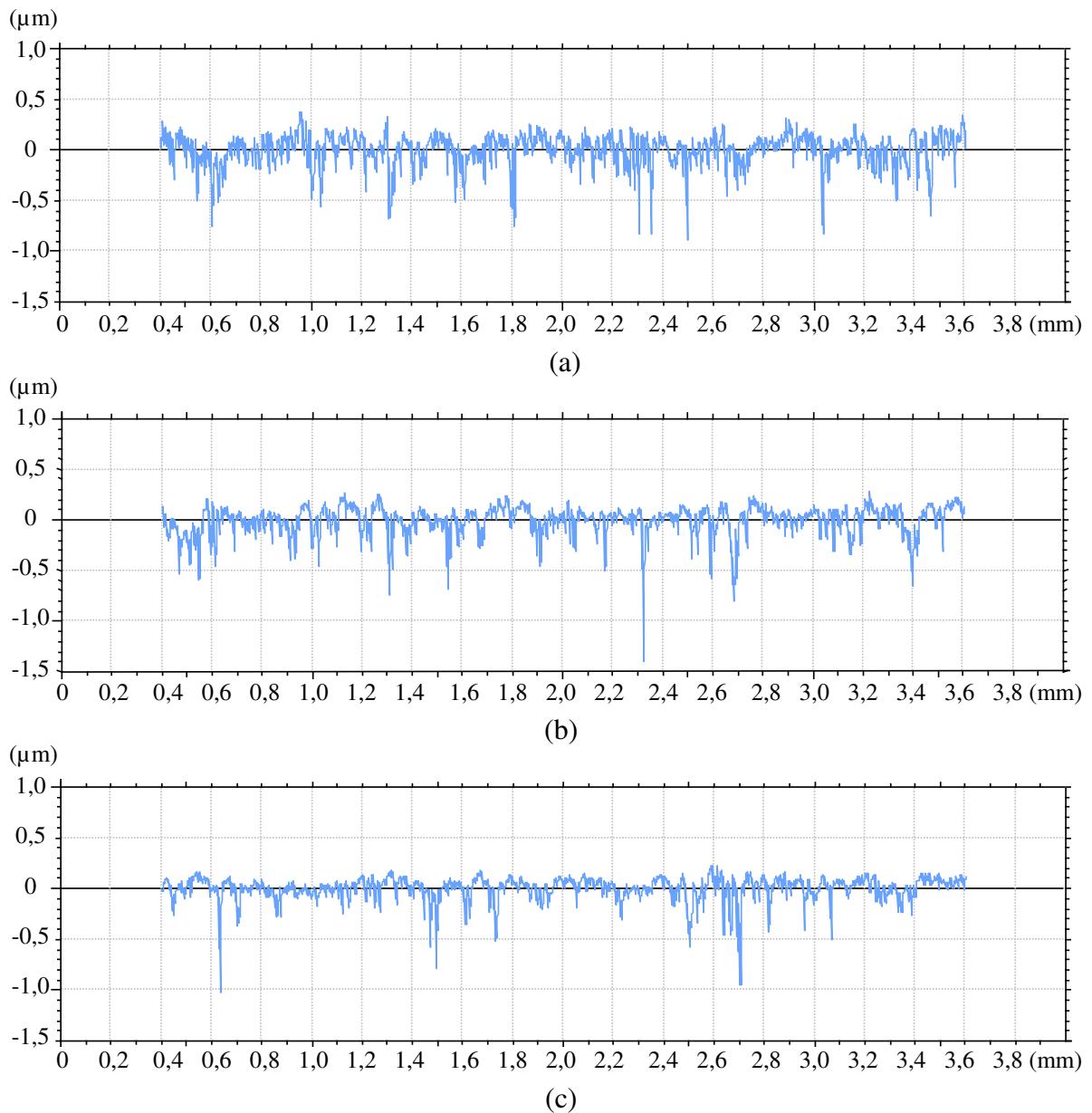


Figura 4.8 - Perfis efetivos referentes aos cilindros (a) do bloco 13 para a medição 5, (b) do bloco 30 para a medição 2 e (c) do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível.

4.2.4. Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade (R_v)

A Figura 4.9 mostra os valores médios de R_v dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE V, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

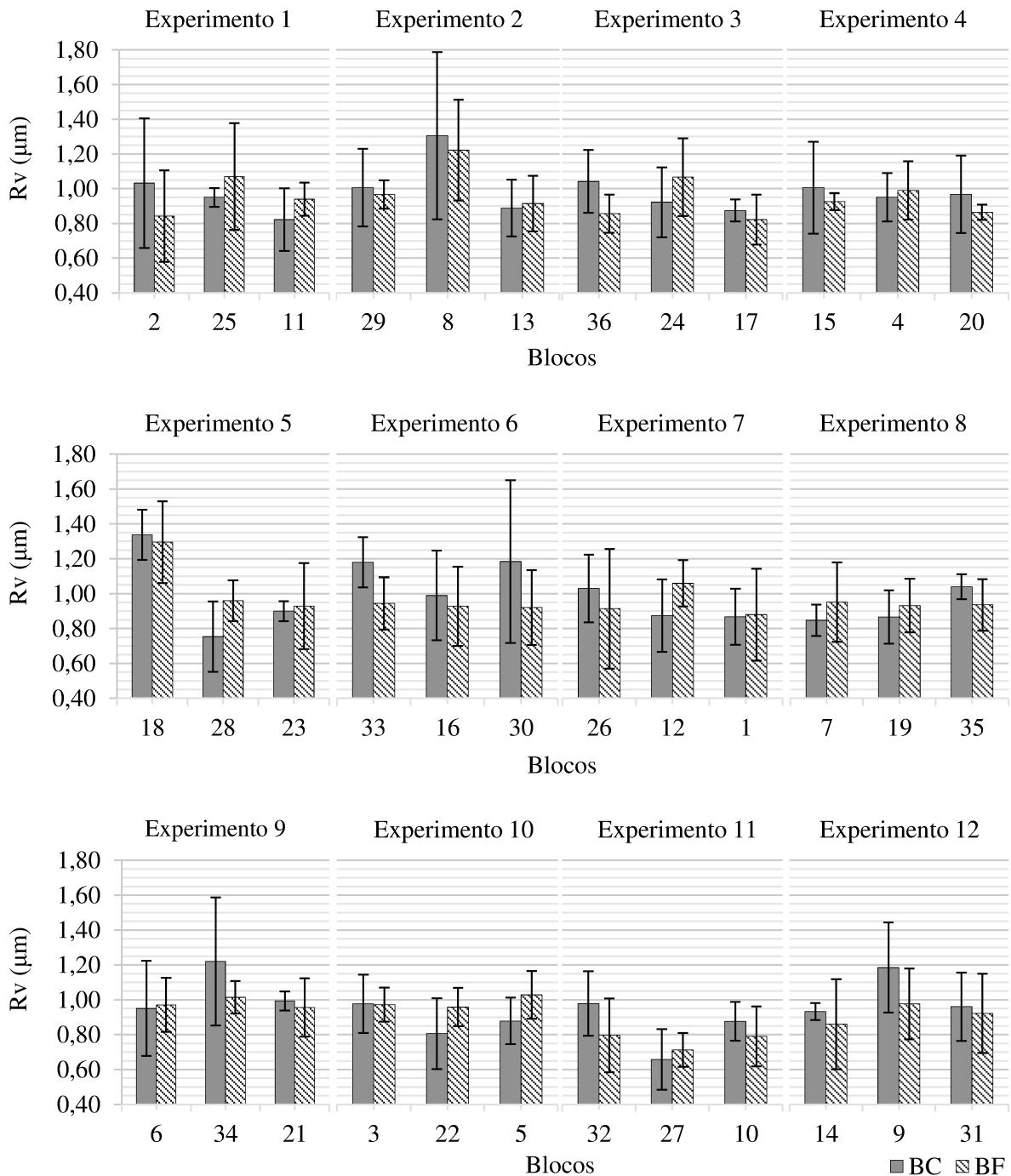


Figura 4.9 - Valores médios do parâmetro R_v para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A Figura 4.9 mostra que os valores médios de R_v se encontram no intervalo de 0,66 μm até 1,34 μm para o brunimento convencional, enquanto que após o brunimento flexível assumem valores entre 0,71 μm e 1,30 μm . Não foi observada nenhuma tendência definida

após o brunimento flexível, pois este processo não altera o valor das ordenadas dos vales do perfil. As diferenças observadas são pouco significativas e podem ser atribuídas ao fato de que a medição é efetuada em locais diferentes e, também porque a linha media do perfil de rugosidade é levemente deslocada no sentido vertical. Os experimentos 1 e 6 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rv entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 1,7% e 16,8%, respectivamente.

A incerteza expandida associada à medição do parâmetro Rv , Fig. 4.15, apresenta valores entre 0,05 μm e 0,49 μm após o brunimento convencional e entre 0,05 μm e 0,35 μm após o brunimento flexível. Não foi verificada nenhuma tendência definida para a incerteza após o brunimento flexível. Observa-se, ainda, que as faixas de valores associados à Rv após os dois processos, encontram-se parcialmente superpostos para todos os blocos.

Na Tabela 4.9 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rv para o cilindro do bloco 16 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível. Nota-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 97,8% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à calibração do rugosímetro com 1,2%. Para os demais blocos, após ambos os processos de brunimento, os resultados foram similares.

Tabela 4.9 - Resultados da avaliação da incerteza do Rv para o cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	1,14	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,08114
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_{Rug}	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,02	B	Triangular	∞	1	0,00758
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,08206
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U) em μm						0,22784

A incerteza expandida para a rugosidade Rv do cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,23 μm , baseada em uma incerteza-padrão combinada

multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,78, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.10 são apresentados os valores médios de Rv para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

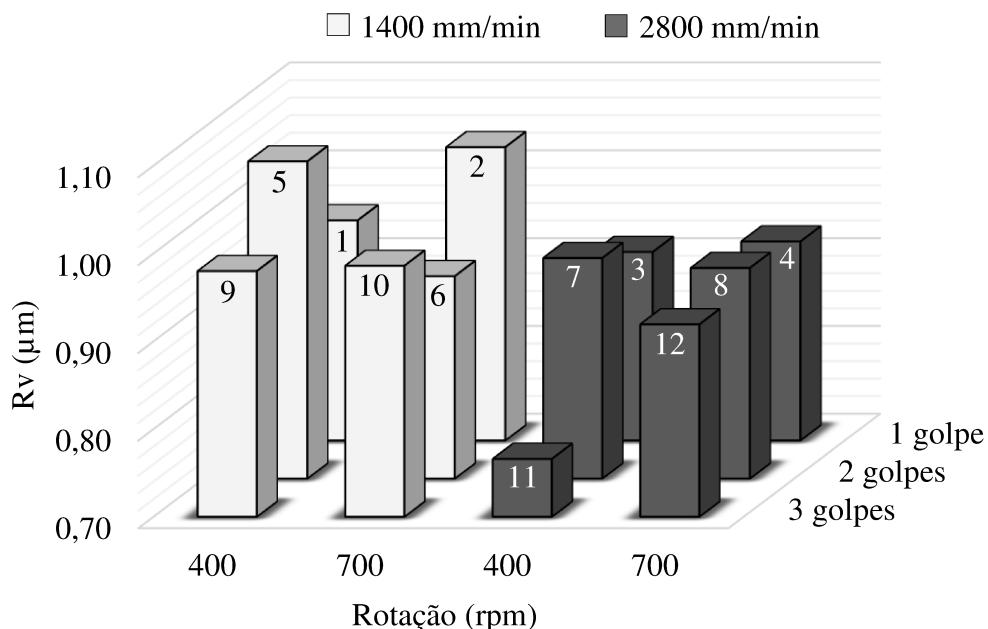


Figura 4.10 - Valores médios do parâmetro Rv para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

De acordo com a Fig. 4.10, os cilindros do experimento 11 apresentaram os menores valores de Rv e os cilindros do experimento 2 os maiores valores. Entretanto, os cilindros destes dois experimentos apresentaram pequenas diferenças percentuais na rugosidade Rv entre os processos de brunimento convencional e flexível, o que conclui que o brunidor flexível praticamente não altera a profundidade dos vales do perfil de rugosidade.

A variação dos parâmetros de usinagem utilizados no brunimento flexível não proporcionou nenhum efeito significativo na rugosidade Rv , com exceção da velocidade de avanço (VA), conforme verificado na Tab. 4.10, que mostra o quadro da ANOVA para a variável resposta Rv .

Tabela 4.10 - ANOVA do parâmetro Rv de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,011441	1	0,011441	1,051185	0,314011	-0,043667
VA	0,068819	1	0,068819	6,323166	0,017939	-0,087444
ROT	0,003173	1	0,003173	0,291581	0,593479	0,018778
NG x VA	0,007073	1	0,007073	0,649847	0,426961	-0,034333
NG x ROT	0,001536	1	0,001536	0,141130	0,709992	0,016000
VA x ROT	0,009539	1	0,009539	0,876436	0,357185	0,032556
Erro	0,304741	28	0,010884			

O aumento da velocidade de avanço da ferramenta proporcionou uma redução na rugosidade Rv . Isto é justificado pelo motivo do parâmetro Rv ser fortemente influenciado pela presença de vales isolados, obtendo maiores dispersões dos valores médios mesmo após o brunimento flexível.

A manutenção dos vales do perfil de rugosidade é essencial para os cilindros dos blocos de compressores herméticos, uma vez que estes servem de canais para a passagem do fluido que lubrifica o par cilindro-pistão.

4.2.5. Altura total do perfil de rugosidade (Rt)

A Figura 4.11 mostra os valores médios de Rt dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE VI, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

Os valores médios de Rt são ligeiramente menores após o brunimento flexível para todos os cilindros, Fig. 4.11. Uma comparação dos resultados mostra que os valores de Rt para o brunimento convencional estão no intervalo de 1,74 μm e 3,29 μm , enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 1,38 μm e 2,16 μm . Os experimentos 3 e 6 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rt entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 20,0% e 33,9%, respectivamente.

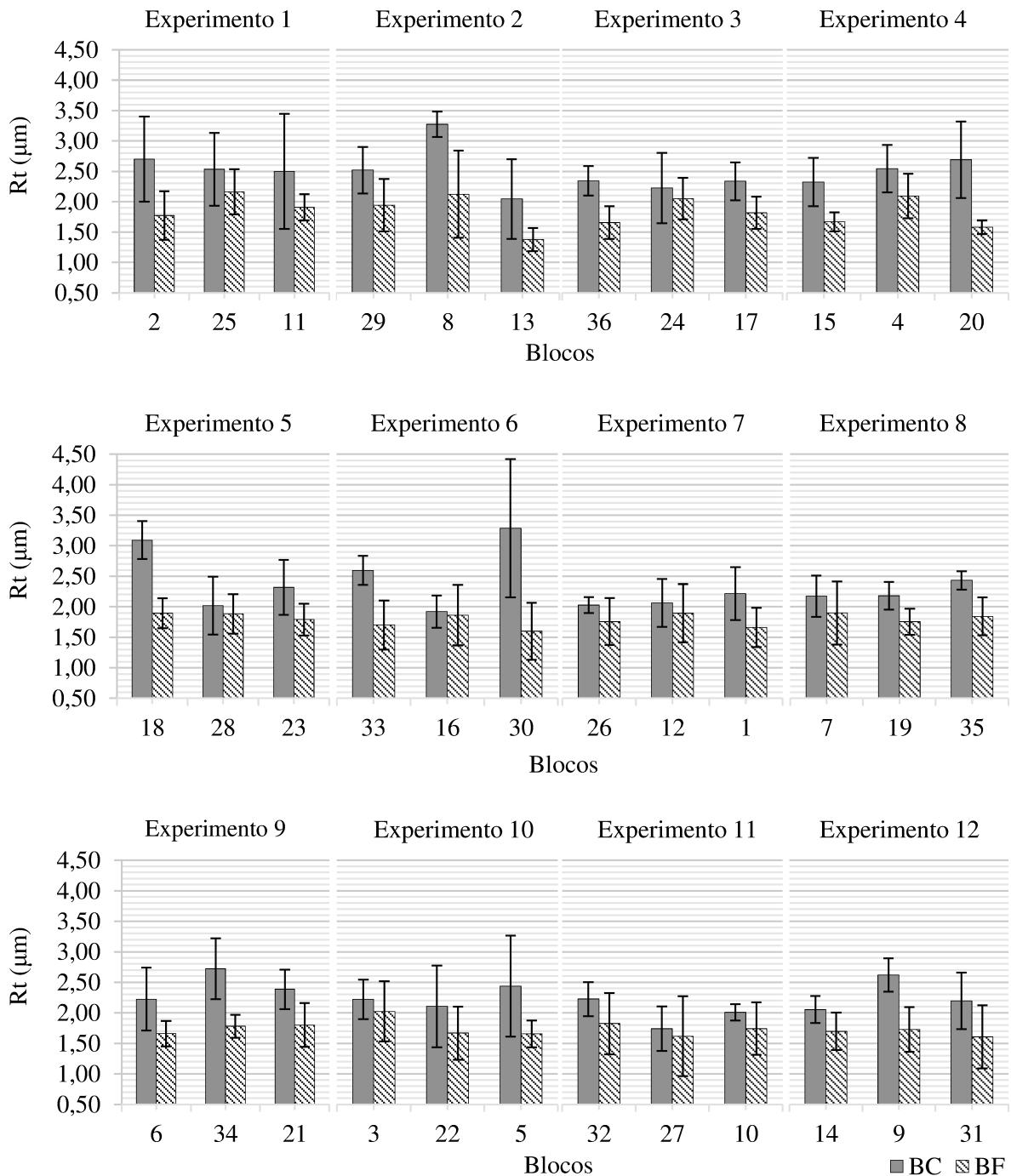


Figura 4.11 - Valores médios do parâmetro R_t para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro R_t , observa-se na Fig. 4.11, que a incerteza apresentou valores entre 0,13 μm e 1,14 μm após o brunimento convencional, e entre 0,12 μm e 0,72 μm após o brunimento flexível. Ainda, verifica-se que

as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Rt após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas para a maioria dos blocos. Não foi observada nenhuma tendência para os valores de incerteza expandida. Isto pode ser explicado devido ao fato do parâmetro Rt ser fortemente influenciado pela presença de picos e vales isolados, uma vez que este é calculado através da soma das ordenadas do pico mais alto e do vale mais profundo. Dessa forma, um pico ou um vale isolado pode elevar o valor de Rt e no entanto, não caracterizar a superfície como um todo. Assim sendo, o parâmetro Rt quando avaliado isoladamente, pode induzir a elaboração de conclusões enganosas.

Na Tabela 4.11 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rt para o cilindro do bloco 30 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível.

Tabela 4.11 - Resultados da avaliação da incerteza do Rt para o cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	1,60	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,16690
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_{Rug}	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,03	B	Triangular	∞	1	0,01305
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,16768
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U) em μm						0,46556

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 99,1% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada ao raio da ponta do apalpador com 0,6%. Isto foi verificado para todos os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível.

A incerteza expandida para a rugosidade Rt do cilindro 30 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,47 μm , baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,78, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.12 são apresentados os valores médios de Rt para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 12 exibiram os menores valores de Rt (rotação de 700 rpm, velocidade de avanço de 2800 mm/min e 3 golpes da ferramenta). Já os cilindros do experimento 1 mostraram os maiores valores de Rt (400 rpm, velocidade de avanço de 1400 mm/min e 1 golpe da ferramenta).

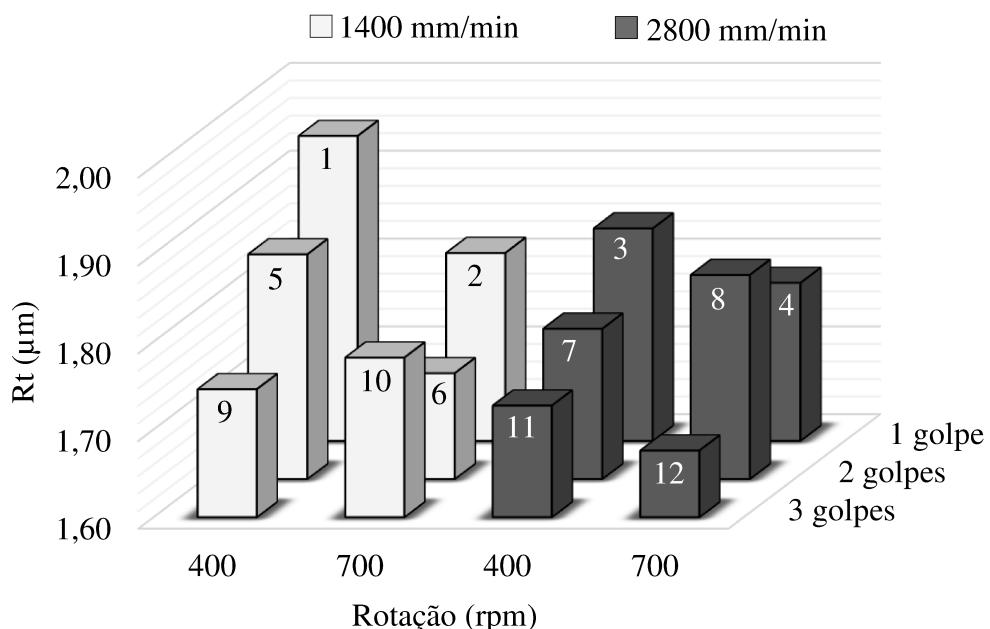


Figura 4.12 - Valores médios do parâmetro Rt para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rt é apresentado na Tab. 4.12.

Tabela 4.12 - ANOVA do parâmetro Rt de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,076614	1	0,076614	2,484406	0,126212	-0,113000
VA	0,014003	1	0,014003	0,454076	0,505931	-0,039444
ROT	0,020259	1	0,020259	0,656943	0,424477	-0,047444
NG x VA	0,000081	1	0,000081	0,002616	0,959573	0,003667
NG x ROT	0,012150	1	0,012150	0,393995	0,535293	0,045000
VA x ROT	0,008160	1	0,008160	0,264613	0,611005	0,030111
Erro	0,863463	28	0,030838			

De acordo com a Tab. 4.12, nenhum dos fatores de controle produziram efeitos significativos na variável resposta Rt .

Juntamente com as análises feitas anteriormente, pode-se concluir que a redução de Rt é caracterizada pela remoção dos picos isolados da superfície do cilindro após o brunimento flexível. Entretanto, este parâmetro é fortemente influenciado pela presença de vales isolados, justificando a elevada dispersão dos valores médios após o brunimento flexível, que apresentou tanto uma redução quanto um aumento ao variar os parâmetros de usinagem.

4.2.6. Coeficiente de vazio (CV)

São mostrados na Fig. 4.13 os valores médios do coeficiente de vazio CV dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE VII, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

Os valores médios do CV são menores após o brunimento flexível para todos os cilindros, Fig. 4.13, sendo que para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,21 até 0,39, enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 0,12 e 0,28. Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual no CV entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 26,2% e 64,5%, respectivamente. Nota-se que a repetibilidade dos valores de CV é dependente das condições de usinagem e apresenta menor dispersão para os cilindros usinados com maior número de golpes da ferramenta, como nos experimentos 9, 10, 11 e 12.

Os valores de incerteza expandida associados ao coeficiente de vazio CV , apresentados na Fig. 4.13, são menores para os cilindros usinados após o brunimento flexível, com exceção dos blocos 18 (experimento 5), 33 (experimento 6), 26 (experimento 7) e 9 (experimento 12), seguindo a tendência do desvio-padrão experimental. Os valores da incerteza estão entre 0,03 e 0,16 após o brunimento convencional e entre 0,03 e 0,08 após o brunimento flexível. As barras de erros encontram-se parcialmente superpostas para 41,7% dos cilindros.

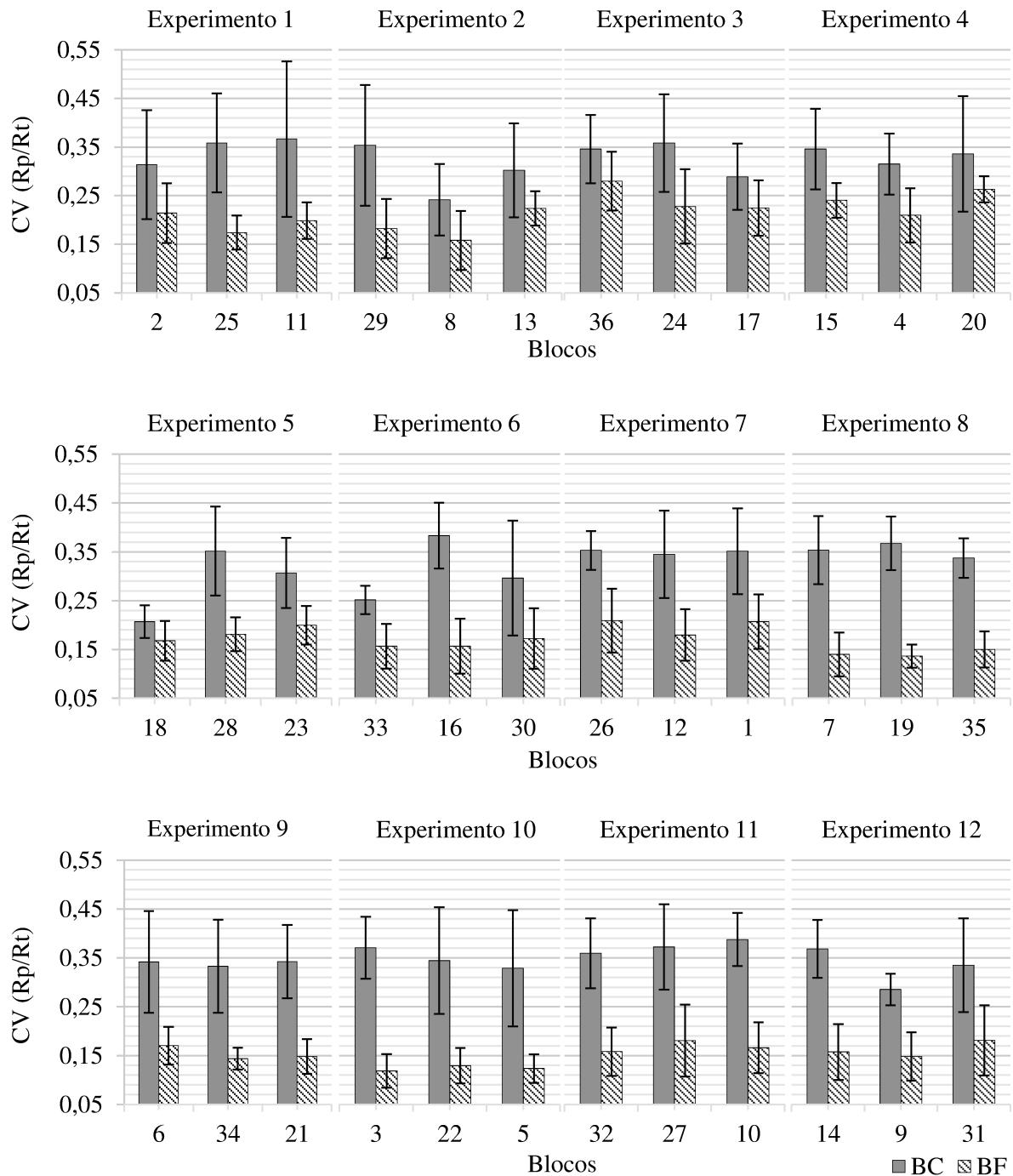


Figura 4.13 - Valores médios do coeficiente de vazio CV para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Na Tabela 4.13 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do coeficiente de vazio CV para o cilindro do bloco 16 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza

associada à medição do parâmetro Rt e representa 97,6% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à medição do parâmetro Rp com 1,5%. Para os demais blocos, após ambos os processos de brunimento, os resultados foram similares.

Tabela 4.13 - Resultados da avaliação da incerteza do coeficiente de vazio CV para o cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,16	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,01746
ΔR_p	0,06	A	<i>T-Student</i>	6	0,53706	0,02196
ΔR_t	0,50	A	<i>T-Student</i>	4	0,08134	0,17852
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,02559
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						11
Fator de abrangência (k)						2,20
Incerteza expandida (U)						0,05631

De acordo com a Tab. 4.13, a incerteza expandida para o coeficiente de vazio CV do cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,06, baseada em uma incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,20, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.14 são apresentados os valores médios do CV para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 10 mostraram os menores valores do CV e os cilindros do experimento 3 os maiores valores. Este resultado está de acordo com o observado para o parâmetro Rp .

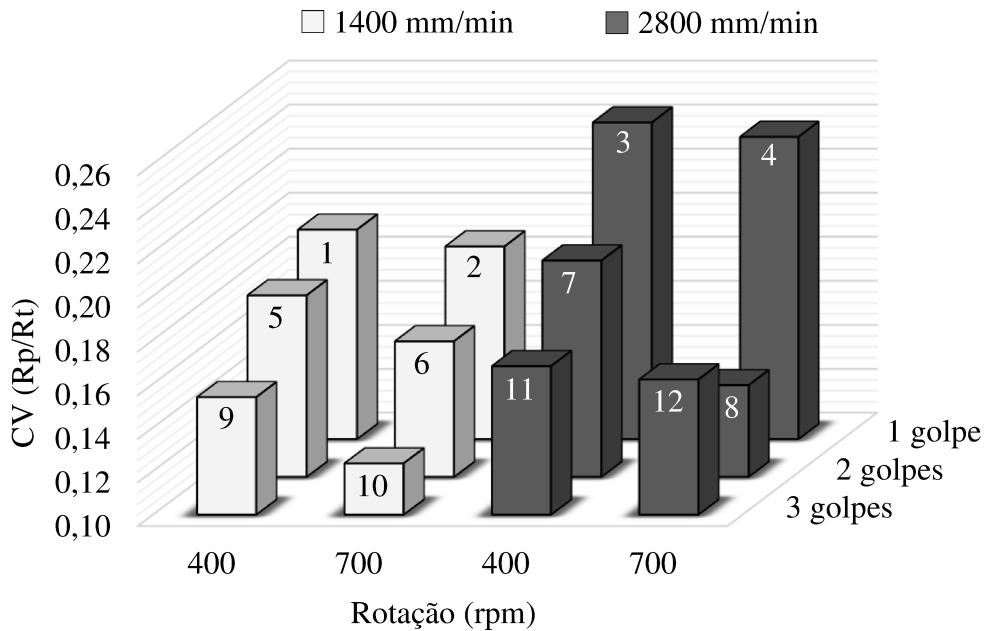


Figura 4.14 - Valores médios do coeficiente de vazio Rp/Rt para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta CV é apresentado na Tab. 4.14. Os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA) e rotação (ROT) produziram efeitos significativos nos valores do CV . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da velocidade de avanço e da rotação da ferramenta.

Tabela 4.14 - ANOVA do coeficiente de vazio CV .

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,024752	1	0,024752	46,57475	0,000000	-0,064229
VA	0,005399	1	0,005399	10,15909	0,003516	0,024493
ROT	0,004108	1	0,004108	7,73041	0,009598	-0,021365
NG x VA	0,000781	1	0,000781	1,47047	0,235404	-0,011413
NG x ROT	0,000187	1	0,000187	0,35239	0,557527	-0,005587
VA x ROT	0,000026	1	0,000026	0,04936	0,825797	-0,001707
Erro	0,014880	28	0,000531			

O coeficiente de vazio CV é pouco conhecido e pouco utilizado, mas é importante para a análise do desgaste da superfície brunida. O coeficiente é reduzido de forma considerável quando se aplica o processo de brunimento flexível, indicando melhorias nas propriedades de

amaciamento da superfície. Conforme observado na ANOVA o aumento do número de golpes e da rotação da ferramenta, bem como a diminuição da velocidade de avanço na usinagem dos cilindros produziram maiores efeitos no coeficiente de vazio, como foi apresentado para o experimento 10 na Fig. 4.14.

O acabamento da superfície do cilindro é o principal fator que afeta as propriedades no período inicial de sua vida e, com a redução do coeficiente de vazio e a criação de superfícies cada vez mais lisas proporciona aumento da resistência ao desgaste.

4.2.7. Curva de Abbott-Firestone

São mostradas a seguir, as curvas de *Abbott-Firestone* referente ao cilindro do bloco 13 (experimento 2) para a medição 1, após o brunimento convencional (Fig. 4.15a) e após o brunimento flexível (Fig. 4.15b).

A curva de *Abbott-Firestone* mostrada na Fig. 4.15a, relativa ao cilindro do bloco 13 usinado pelo brunimento convencional, mostra que 10% do material do cilindro, corresponde aproximadamente a 0,50 μm da altura do perfil. De 0,50 μm a 1,00 μm de altura, encontra-se 80% do material, restando para 1,00 μm os últimos 10% de material. Já a curva obtida na Fig. 4.15b, referente ao cilindro usinado pelo brunimento flexível, revela que 10% do material está localizado em aproximadamente 0,25 μm , enquanto que 80% do material está entre 0,25 μm e 0,60 μm de altura. Os 10% de material restante, encontram-se em 0,60 μm de altura.

Verifica-se que o cilindro usinado pelo brunimento flexível apresentou maior parte do material localizado na parte inferior do perfil, comparado ao perfil obtido pelo brunimento convencional, consequentemente a linha média deslocou-se para cima. Isto se deve à redução da altura dos picos do perfil obtido após o brunimento flexível.

Na Figura 4.15, também é possível observar, os valores relativos ao percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os picos da rugosidade central ($Mr1$) e que separa os vales da rugosidade central ($Mr2$). Verifica-se que os parâmetros Rpk e Rvk representam as cotas verticais dos picos e vales respectivamente, calculados como sendo a altura do cateto vertical do triângulo-retângulo construído. Dessa forma, a área do triângulo-retângulo localizado na região superior da curva denominada como $A1$, equivale ao $Mr1$, enquanto que a área do triângulo-retângulo localizado na região inferior da curva denominada como $A2$, equivale ao $Mr2$. É possível constatar que a área $A1$ sofreu uma redução após o brunimento flexível.

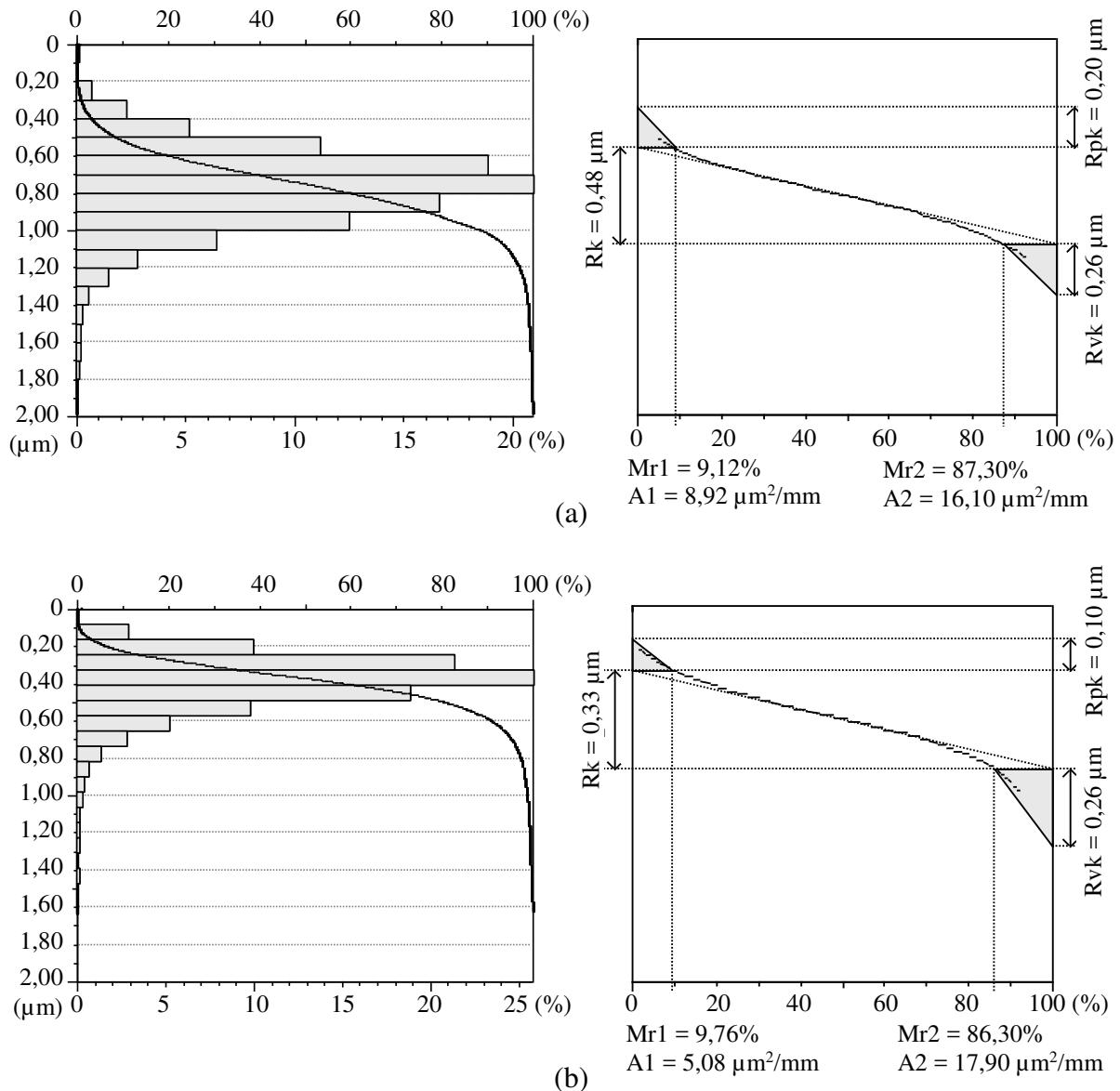


Figura 4.15 - Curvas de Abbott-Firestone referente ao cilindro do bloco 13 para a medição 1
(a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento flexível.

Considerando-se que a ação de alisamento da superfície é mais significativa que a ação de criação de novas irregularidades, é possível acompanhar a ação de alisamento com a redução dos valores de Rpk de $0,20 \mu\text{m}$, na Fig. 4.15a, para $0,10 \mu\text{m}$, na Fig. 4.15b. Além da redução da região de picos do perfil, ocorre a redução da região central Rk de $0,48 \mu\text{m}$ para $0,33 \mu\text{m}$.

É possível identificar a mudança geral na forma da curva após o brunimento flexível, sendo que na Fig. 4.15a, a região central apresenta maior inclinação do que a observada na Fig. 4.15b após o brunimento flexível. O desgaste ocorrido na região do perfil conhecida

como Rpk é responsável por indicar o amaciamento da superfície, ou seja, a remoção dos picos do perfil. A alteração da inclinação da região central é ligada diretamente a redução do parâmetro Rk e representa a tendência à concentração da área na região de contato da superfície brunida.

Por sua vez, a variação do parâmetro Rvk para as duas condições é pequena, Fig. 4.15. Este parâmetro corresponde à capacidade de lubrificação, ou seja, a presença de vales para a retenção do fluido lubrificante na superfície.

A alteração dos valores dos parâmetros de usinagem (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta) no brunimento flexível dos cilindros também proporcionou uma maior redução nos valores dos parâmetros Rpk e Rk . Na Figura 4.16 são exibidas as curvas de *Abbott-Firestone* referentes aos cilindros do bloco 13 para a medição 1 (Fig. 4.16a) e do bloco 22 para a medição 1 (Fig. 4.16b). Comparando-se a curva da Fig. 4.16b com aquela mostrada na Fig. 4.16a, observa-se a ação de alisamento da superfície com a redução do valor de Rpk para 0,06 μm e o valor de Rk para 0,18 μm . Estes valores são aproximadamente 40% menores que os parâmetros Rpk e Rk da peça 13 apresentado na Fig. 4.16a, sendo o número de golpes da ferramenta, que foi de 1 golpe para a peça 13 e 3 golpes para a peça 22, que proporcionou esta redução.

Também é possível identificar uma mudança na forma da curva à medida que ocorre o aumento do número de golpes da ferramenta, sendo que na Fig. 4.16b a região central apresenta menor inclinação do que a observada na Fig. 4.16a.

Verifica-se, ainda, que o cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível com 3 golpes da ferramenta apresentou maior parte do material localizado na parte inferior do perfil, comparado ao perfil obtido no cilindro 13 (Fig. 4.16a). Isto comprova a redução da altura dos picos do perfil com o aumento do número de golpes da ferramenta.

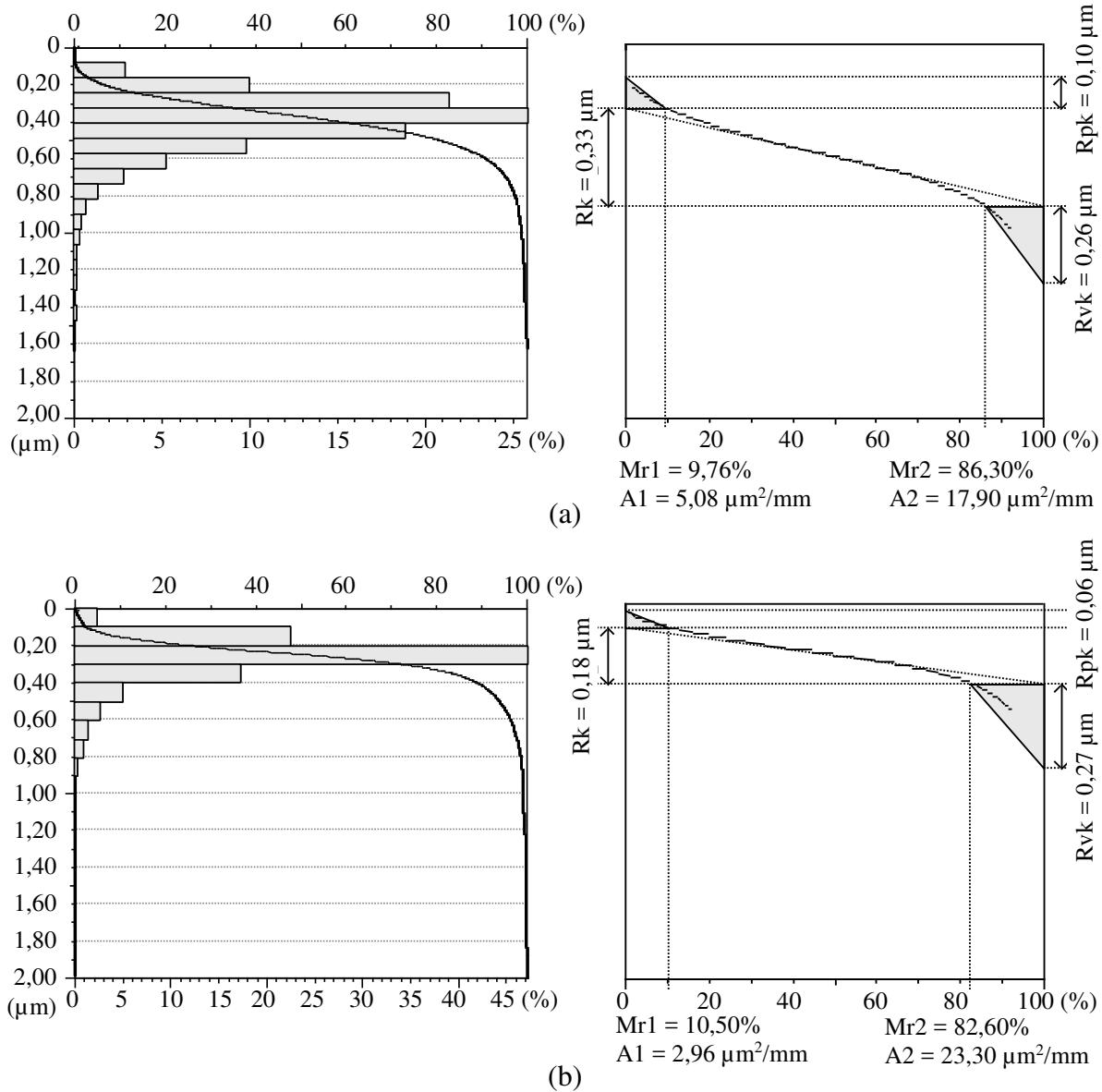


Figura 4.16 - Curvas de Abbott-Firestone referentes aos cilindros (a) do bloco 13 para a medição 1 e (b) do bloco 22 para a medição 1, após o brunimento flexível.

4.2.8. Rugosidade do núcleo do perfil (Rk)

A Figura 4.17 mostra os valores médios de Rk dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE VIII, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

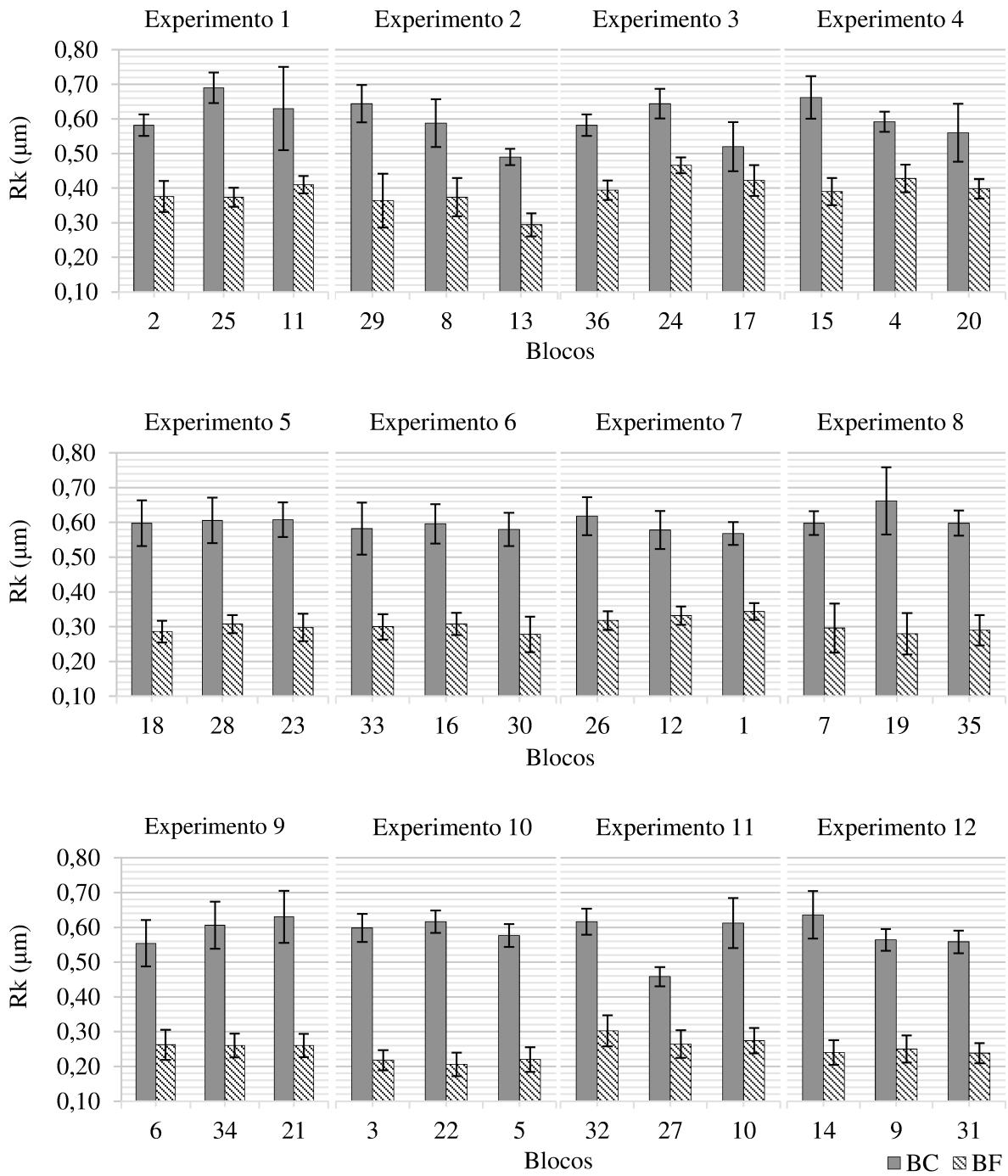


Figura 4.17 - Valores médios do parâmetro Rk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores médios de Rk sofreram uma redução após o brunimento flexível para todos os cilindros, conforme apresentado na Fig. 4.17. Observa-se que os valores de Rk para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,46 μm até 0,69 μm , enquanto que para o

brunimento flexível se encontram entre 0,21 μm e 0,47 μm . Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rk entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 26,6% e 64,0%, respectivamente. Baixos valores de Rk indicam uma alta resistência mecânica e alta capacidade de suportar cargas em operações de contato. Portanto o brunimento flexível atenuou estas características na superfície do cilindro.

Em relação à repetibilidade dos valores médios de Rk , ela mostrou-se dependente das condições de usinagem, conforme verificado para os parâmetros Ra , Rq e Rp . Menores dispersões foram observadas para os cilindros usinados com maior número de golpes da ferramenta, como nos experimentos 9, 11 e 12.

Os valores da incerteza expandida associados à medição do parâmetro Rk , exibidas na Fig. 4.17, estão entre 0,03 μm e 0,13 μm após o brunimento convencional e entre 0,03 μm e 0,08 μm após o brunimento flexível. Observa-se que a incerteza é menor após o brunimento flexível para 75% dos cilindros e as faixas de valores da incerteza expandida, após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superposta apenas para a peça 17.

Na Tabela 4.15 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rk para o cilindro do bloco 5 (experimento 10) usinado pelo brunimento flexível.

Tabela 4.15 - Resultados da avaliação da incerteza do R_k para o cilindro 5 usinado pelo brunimento flexível.

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 60,9% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à calibração do rugosímetro com 32,7%. Isto foi verificado para a maioria dos cilindros, com exceção de três cilindros (blocos 13, 4 e 27) após o brunimento convencional e nove cilindros (blocos 25, 11, 36, 24, 20, 28, 26, 12 e 1) após o brunimento flexível, nos quais a incerteza associada à calibração do rugosímetro foi a variável de maior contribuição. Ou seja, a variabilidade das leituras diminuiu, o que justifica os menores valores de incerteza expandida obtidos para 75% dos cilindros após o brunimento flexível.

A incerteza expandida para a rugosidade Rk do cilindro 5 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo $0,04 \mu\text{m}$, baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,26, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Verifica-se na Fig. 4.18 os valores médios de Rk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Nota-se que os cilindros do experimento 10 apresentaram os menores valores de Rk e os cilindros do experimento 3 mostraram os maiores valores.

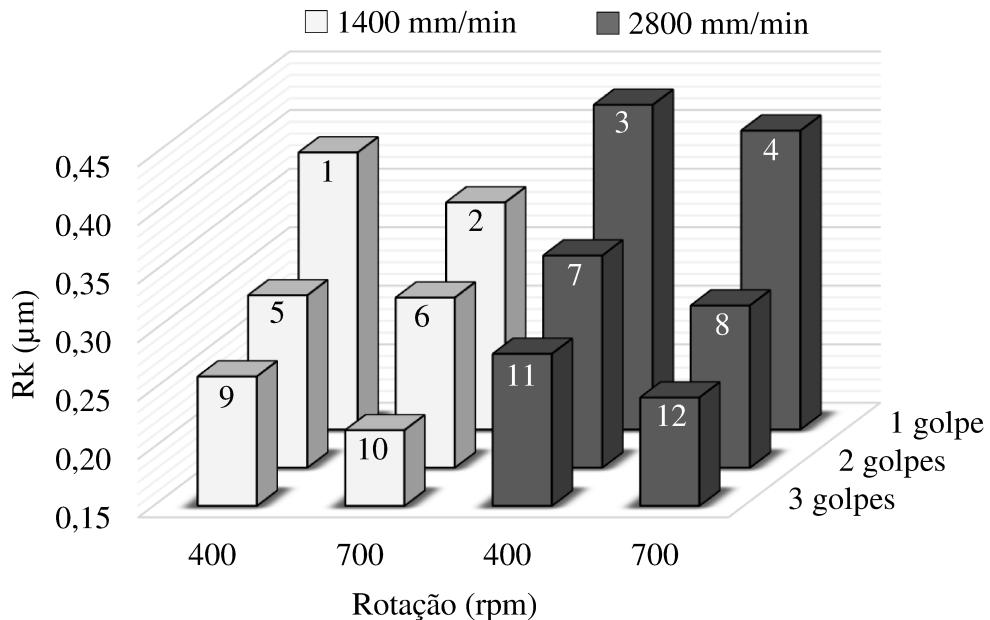


Figura 4.18 - Valores médios do parâmetro Rk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rk é apresentado na Tab. 4.16. Observa-se que os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA) e rotação (ROT), utilizados no brunimento flexível dos cilindros, produziram efeitos significativos na variável resposta Rk . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação e da velocidade de avanço da ferramenta.

Tabela 4.16 - ANOVA do parâmetro Rk de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,119851	1	0,119851	251,1464	0,000000	-0,141333
VA	0,007803	1	0,007803	16,3507	0,000374	0,029444
ROT	0,009280	1	0,009280	19,4464	0,000139	-0,032111
NG x VA	0,001121	1	0,001121	2,3484	0,136638	-0,013667
NG x ROT	0,000131	1	0,000131	0,2738	0,604903	-0,004667
VA x ROT	0,000032	1	0,000032	0,0673	0,797224	-0,001889
Erro	0,013362	28	0,000477			

Observa-se na Fig. 4.18, que a utilização de maior número de golpes da ferramenta (3 golpes) e rotação (700 rpm), bem como menor velocidade de avanço (1400 mm/min) no brunimento dos cilindros, produz pequenos valores de Rk , indicando uma alta resistência mecânica e alta capacidade de suportar cargas em operações de contato, como no mecanismo cilindro-pistão.

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. 4.16, que representa a tendência à concentração da área na região de contato da superfície brunida. Esta mudança na forma da curva é proporcionada pela variação dos parâmetros de usinagem.

4.2.9. Região de pico (Rpk)

A Figura 4.19 mostra os valores médios de Rpk dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE IX, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

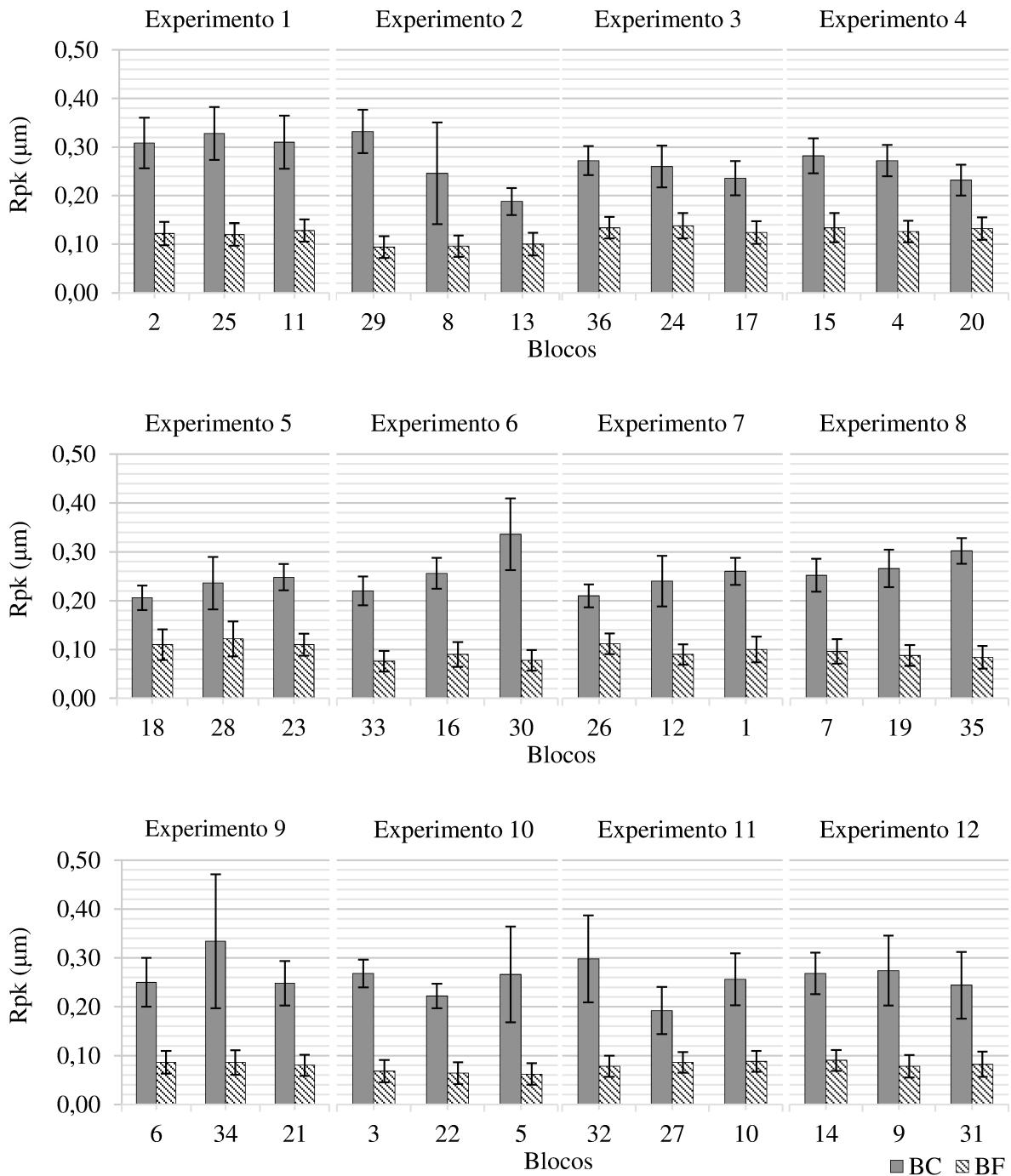


Figura 4.19 - Valores médios do parâmetro R_{pk} para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A partir da Fig. 4.19, observa-se que os valores médios de R_{pk} sofreram uma redução significativa após o brunimento flexível para todos os cilindros. Uma comparação dos resultados mostra que os valores de R_{pk} para o brunimento convencional estão no intervalo de

0,19 μm até 0,34 μm , enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre 0,06 μm e 0,14 μm . Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rpk entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 48,4% e 74,3%, respectivamente. Os valores médios de Rpk apresentaram menores dispersões em todos os experimentos após o brunimento flexível, independentemente das condições de usinagem utilizadas no brunimento flexível.

Os valores de incerteza expandida associados ao parâmetro Rpk , presentes na Fig. 4.19, apresentam valores entre 0,03 μm e 0,14 μm após o brunimento convencional e entre 0,03 μm e 0,04 μm após o brunimento flexível. Observa-se que estes são menores após o brunimento flexível para todos os cilindros, com exceção da peça 18 (experimento 5), seguindo a tendência do desvio-padrão experimental. Assim, pode-se afirmar que os valores obtidos após o brunimento flexível são mais precisos quando comparados aos obtidos pelo brunimento convencional.

Na Tabela 4.17 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rpk para o cilindro do bloco 22 (experimento 10) usinado pelo brunimento flexível.

Tabela 4.17 - Resultados da avaliação da incerteza do Rpk para o cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza-padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,06	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,00400
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_{Rug}	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,001	B	Triangular	∞	1	0,00052
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,01045
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						16
Fator de abrangência (k)						2,12
Incerteza expandida (U) em μm						0,02215

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à calibração do rugosímetro e representa 73,6% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à variabilidade das leituras com 14,6%. Isto foi verificado para a maioria

dos cilindros após o brunimento flexível, com exceção dos blocos 15, 18 e 28, nos quais a incerteza associada à variabilidade das leituras foi a variável de maior contribuição. Já para os cilindros após o brunimento convencional a variável que mais contribuiu foi a incerteza associada à variabilidade das leituras, com exceção dos blocos 13, 18, 23, 26, 1, 35, 3 e 22 que foi a incerteza associada à calibração do rugosímetro. Isto justifica os menores valores de incerteza expandida obtidos para os cilindros após o brunimento flexível.

A incerteza expandida para a rugosidade Rpk do cilindro 22 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo $0,03 \mu\text{m}$, baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,12, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura 4.20 são apresentados os valores médios de Rpk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

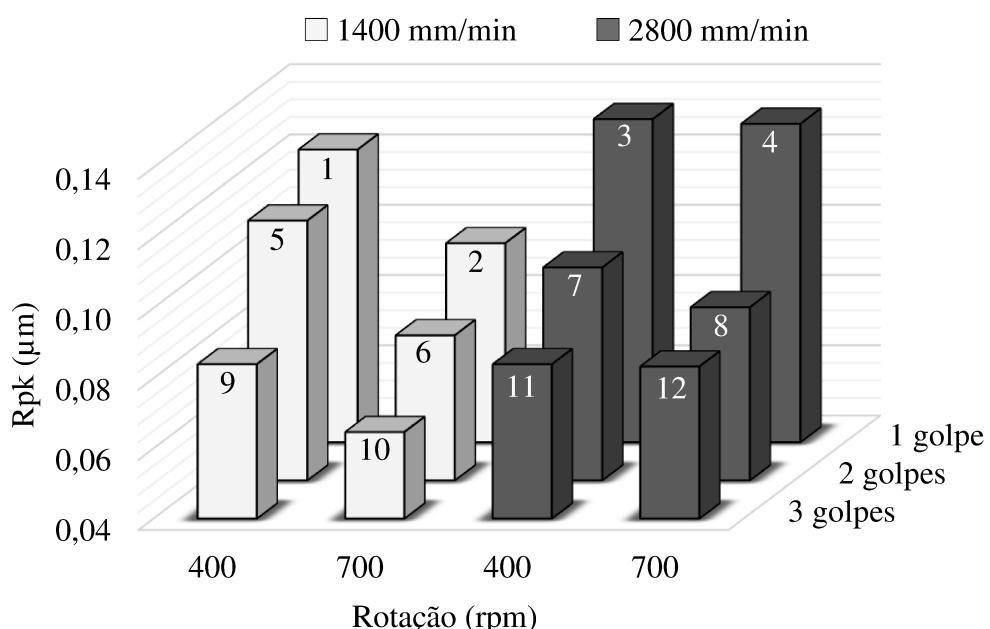


Figura 4.20 - Valores médios do parâmetro Rpk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

Verifica-se na Fig. 4.20, que os cilindros do experimento 10 apresentaram os menores valores de Rpk , seguindo a tendência observada para o parâmetro Rp . Já os cilindros do experimento 3 mostraram os maiores valores de Rpk .

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rpk é apresentado na Tab. 4.18.

Tabela 4.18 - ANOVA do parâmetro Rpk de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,010417	1	0,010417	165,8873	0,000000	-0,041667
VA	0,000784	1	0,000784	12,4853	0,001445	0,009333
ROT	0,002116	1	0,002116	33,6977	0,000003	-0,015333
NG x VA	0,000216	1	0,000216	3,4398	0,074201	-0,006000
NG x ROT	0,000024	1	0,000024	0,3822	0,541423	0,002000
VA x ROT	0,001067	1	0,001067	16,9939	0,000302	0,010889
Erro	0,001758	28	0,000063			

De acordo com a Tab. 4.18, o número de golpes da ferramenta (*NG*), a velocidade de avanço (*VA*), a rotação (*ROT*) e a interação entre velocidade de avanço e rotação (*VA x ROT*), produziram efeitos significativos na variável de resposta Rpk . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação, da interação entre velocidade de avanço e rotação e da velocidade de avanço.

Como foi apresentado na Fig. 4.20, os cilindros do experimento 10 mostram os menores valores de Rpk , devido ao aumento do número de golpes e da rotação da ferramenta, bem como a utilização de baixa velocidade de avanço. Estes parâmetros promoveram um maior desgaste na região de pico, que é responsável por indicar o amaciamento da superfície, ou seja, a remoção dos picos do perfil. Também é possível observar na curva de *Abbott-Firestone* da Fig. 4.16 a redução da porção dos picos protuberantes acima da rugosidade central, devido à variação do número de golpes da ferramenta.

4.2.10. Região de vale (Rvk)

A Figura 4.21 apresenta os valores médios de Rvk dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE X, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

Os valores médios de Rvk não apresentaram uma tendência definida após o brunimento flexível, Fig. 4.21, uma vez que este processo não altera a profundidade dos vales do perfil. Observou-se que os valores médios se encontram no intervalo de 0,30 μm até 0,42 μm para o brunimento flexível, enquanto que para o brunimento convencional notam-se valores entre 0,25 μm e 0,47 μm . Os experimentos 8 e 6 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Rvk entre os processos de brunimento convencional e

flexível, sendo em média de 0% e 12,2%, respectivamente. Estas diferenças são pouco significativas e podem ser atribuídas ao fato de que a medição foi efetuada em locais diferentes.

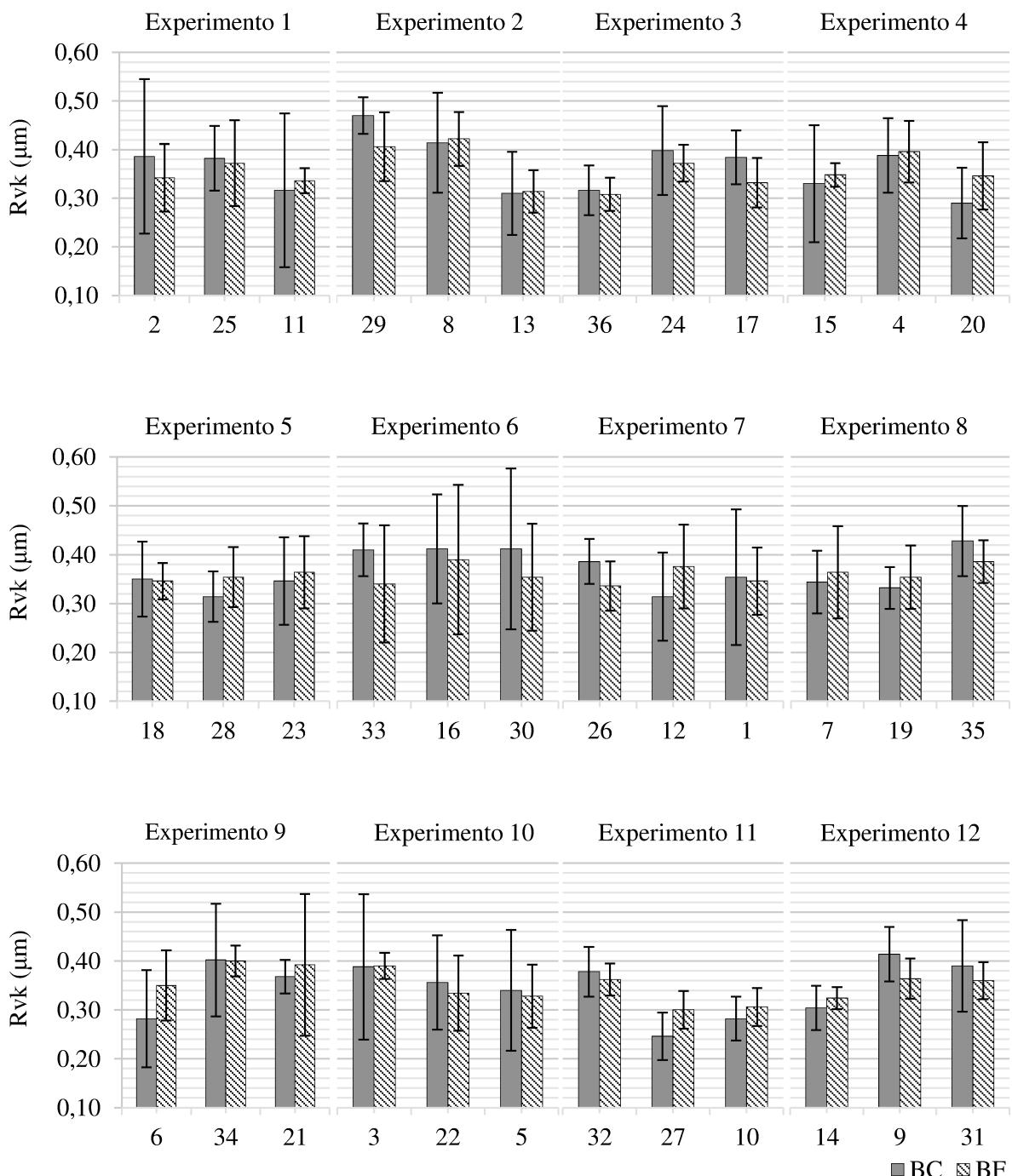


Figura 4.21 - Valores médios do parâmetro Rvk para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores de incerteza expandida associados à medição do parâmetro Rvk , exibidos na Fig. 4.21, apresentam-se entre 0,04 μm e 0,17 μm após o brunimento convencional e entre 0,03 μm e 0,16 μm após o brunimento flexível. Não foi verificada nenhuma tendência definida para a incerteza após o brunimento flexível, pois os vales isolados presentes no perfil de rugosidade e a medição efetuada em locais diferentes influenciaram em uma maior variabilidade das leituras. Observa-se, ainda, que as faixas de valores associadas à Rvk após os dois processos, encontram-se parcialmente superpostas para todos os blocos.

Na Tabela 4.19 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade Rvk para o cilindro do bloco 33 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível.

Tabela 4.19 - Resultados da avaliação da incerteza do Rvk para o cilindro 33 usinado pelo brunimento flexível.

Componentes de incerteza						
Grandezas	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Rug})$	0,34	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,04207
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_{Rug}	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,007	B	Triangular	∞	1	0,00278
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,04325
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U) em μm						0,12008

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 94,6% da incerteza padrão-combinada, seguida da incerteza associada à calibração do rugosímetro com 4,3%. Isto foi verificado para a maioria dos cilindros, com exceção dos blocos 11, 15, 3 e 14, usinados pelo brunimento flexível, nos quais a incerteza associada à calibração do rugosímetro foi a variável de maior contribuição.

A incerteza expandida para a rugosidade Rvk do cilindro 33 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo 0,12 μm , baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,78, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

São apresentados na Fig. 4.22 os valores médios de Rvk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

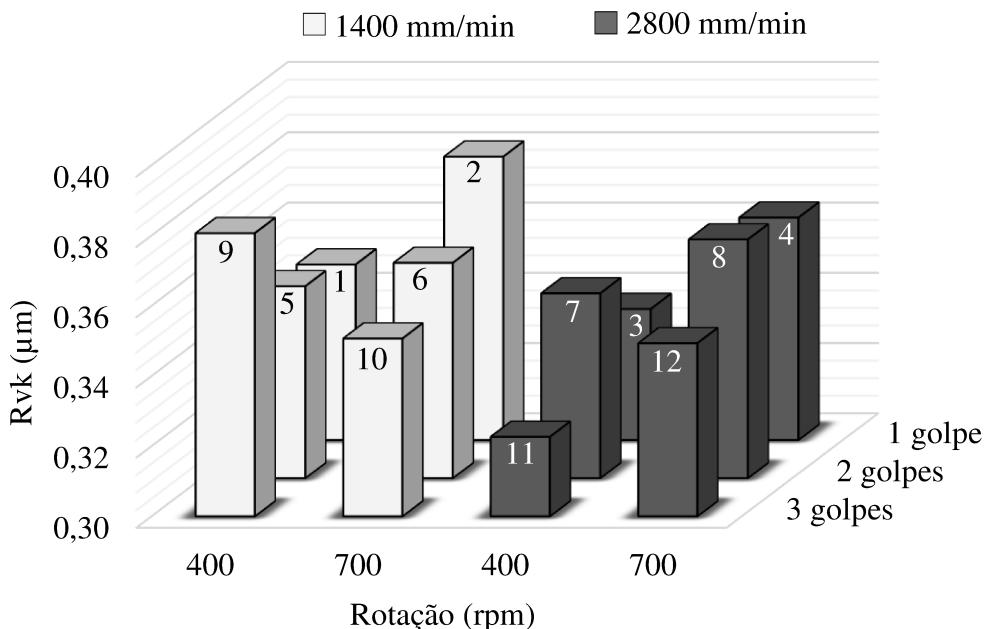


Figura 4.22 - Valores médios do parâmetro Rvk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

Os cilindros do experimento 11 apresentaram os menores valores de Rvk e os cilindros do experimento 2 os maiores valores, conforme a Fig. 4.22. Entretanto, os cilindros destes dois experimentos apresentaram pequenas diferenças percentuais na rugosidade Rvk entre os processos de brunimento convencional e flexível, o que conclui que os parâmetros de usinagem não influenciaram na rugosidade, como pode ser verificado na curva de *Abbott-Firestone* da Fig. 4.16 e, também, na Tab. 4.20 que mostra o quadro da ANOVA para a variável resposta Rvk .

O aumento dos valores de Rvk indica uma melhoria das propriedades da superfície para retenção de lubrificantes, enquanto a redução, o inverso. No entanto o brunidor flexível não altera a profundidade dos vales e mantém a retenção do fluido lubrificante.

Tabela 4.20 - ANOVA do parâmetro Rvk de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,000294	1	0,000294	0,342895	0,562853	-0,007000
VA	0,001792	1	0,001792	2,090158	0,159352	-0,014111
ROT	0,001419	1	0,001419	1,654735	0,208851	0,012556
NG x VA	0,000323	1	0,000323	0,376329	0,544526	-0,007333
NG x ROT	0,001350	1	0,001350	1,574519	0,219925	-0,015000
VA x ROT	0,000920	1	0,000920	1,073135	0,309103	0,010111
Erro	0,024007	28	0,000857			

4.2.11. Volume de retenção de óleo (Vo)

A Figura 4.23 mostra os valores médios de Vo dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE XI, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

Os valores médios de Vo foram aumentados após o brunimento flexível para todos os cilindros, Fig. 4.23, com exceção do cilindro 17 (experimento 3). Uma comparação dos resultados mostra que os valores de Vo para o brunimento convencional estão no intervalo de $0,014989 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ até $0,034480 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, enquanto que para o brunimento flexível se encontram entre $0,021904 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ e $0,034480 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$. Os experimentos 3 e 9 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade Vo entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 6,3% e 71,8%, respectivamente. Observa-se, ainda, uma alta dispersão dos valores médios após o brunimento flexível.

O aumento dos valores médios do volume de retenção de óleo Vo pode ser justificado pela diminuição do $Mr2$ (percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os vales da rugosidade central), uma vez que para o cálculo do parâmetro Vo utiliza-se os valores dos parâmetros Rvk e $Mr2$, e como foi verificado que a rugosidade Rvk não apresentou efeitos significativos após o brunimento flexível, conclui-se que o $Mr2$ ocasionou este aumento do Vo . A redução do $Mr2$ é mostrada na Fig. 4.15 e é ocasionada pela mudança na forma da curva de *Abbott-Firestone*, pois à medida que ocorre o brunimento flexível, a região central apresenta menor inclinação, modificando a curva e, consequentemente, o valor de $Mr2$.

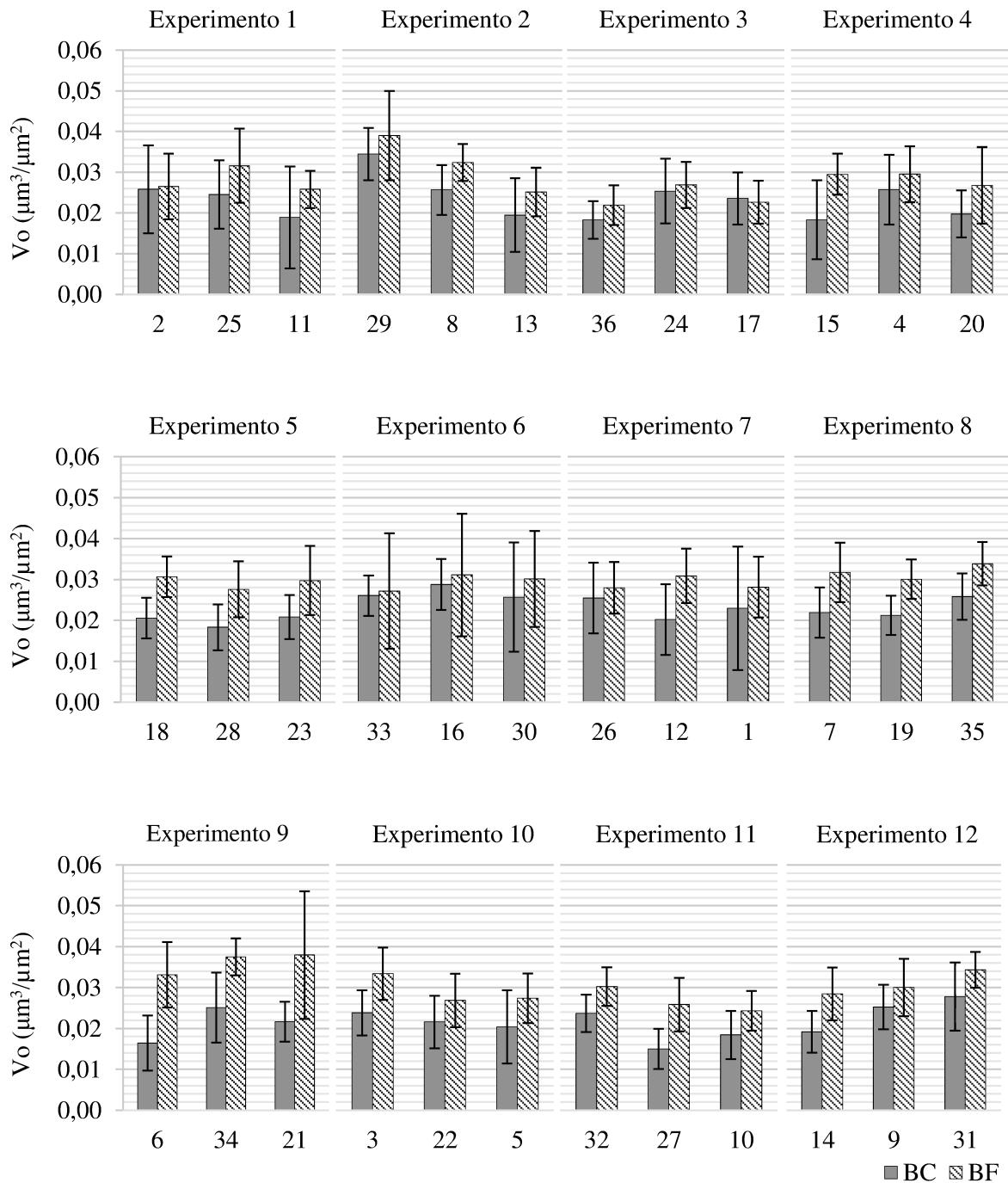


Figura 4.23 - Valores médios do parâmetro Vo para os cilindros usinados pelo brinamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Em relação aos valores de incerteza expandida associados à medição do parâmetro Vo , exibidos na Fig. 4.21, apresentam-se entre $0,004598 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ e $0,015120 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ após o brinamento convencional e entre $0,0045173 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ e $0,0156108 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ após o

brunimento flexível. Como analisado para o parâmetro Rvk , não foi verificada nenhuma tendência definida para a incerteza expandida de Vo após o brunimento flexível. Observa-se, ainda, que as faixas de valores associadas à Vo após os dois processos, encontram-se parcialmente superpostas para todos os blocos, com exceção do cilindro 6 (experimento 9). A variável que mais contribuiu para a incerteza final após os dois tipos de brunimento foi à incerteza associada à variabilidade das leituras.

Na Figura 4.24 são apresentados os valores médios do parâmetro Vo para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 3 apresentaram os menores valores de Vo e os cilindros do experimento 9 mostraram os maiores valores.

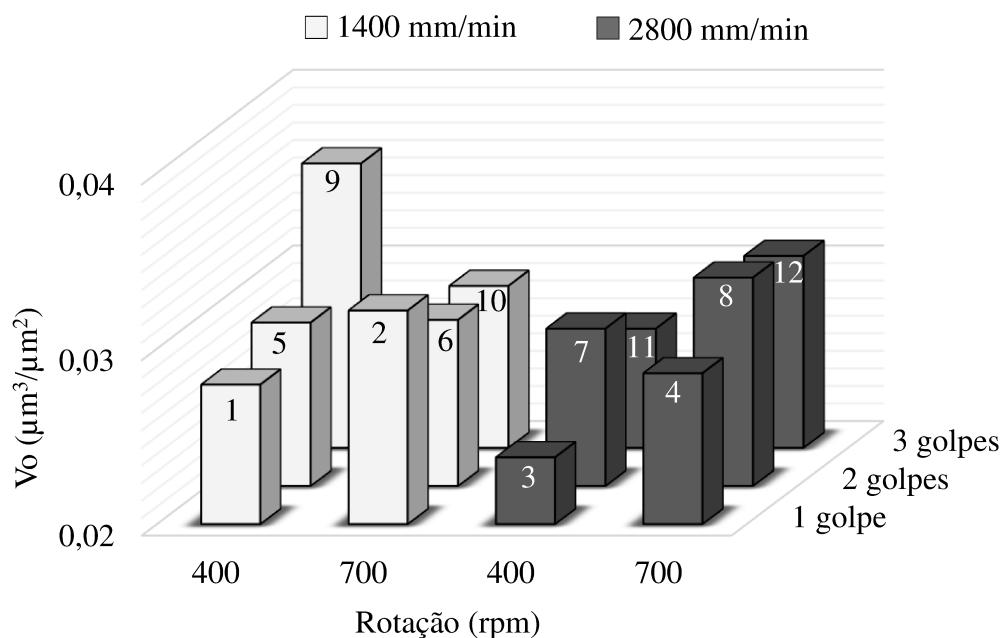


Figura 4.24 - Valores médios do parâmetro Vo para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Vo é apresentado na Tab. 4.21 e mostra que a interação entre número de golpes e rotação ($NG \times ROT$) e a interação entre velocidade de avanço e rotação ($VA \times ROT$) produziram efeitos significativos na variável de resposta Vo . Entretanto, estas interações apresentaram pequenos efeitos na rugosidade Vo , e pode ser justificada pelo fato de que a medição foi efetuada em locais diferentes e ser fortemente

influenciada pela presença de vales isolados, uma vez que para o cálculo do volume de retenção de óleo Vo utiliza-se o parâmetro Rvk .

Tabela 4.21 - ANOVA do parâmetro Vo de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,000042	1	0,000042	3,525669	0,070878	0,002647
VA	0,000045	1	0,000045	3,737645	0,063369	-0,002225
ROT	0,000021	1	0,000021	1,790362	0,191648	0,001540
NG x VA	0,000000	1	0,000000	0,000014	0,997055	0,000005
NG x ROT	0,000053	1	0,000053	4,413147	0,044792	-0,002962
VA x ROT	0,000052	1	0,000052	4,366299	0,045862	0,002405
Erro	0,000334	28	0,000012			

4.2.12. Fator de assimetria do perfil de rugosidade (Rsk)

A Figura 4.25 mostra os valores médios de Rsk dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE XII, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) obtidos durante a simulação de MC para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

De acordo com a Fig. 4.25, todos os valores de Rsk são negativos para os dois processos, com exceção do bloco 11 (experimento 1) para o brunimento convencional, que exibiu valor médio de Rsk de 0,10. Ainda, foi possível observar uma redução para todos os valores médios após o brunimento flexível. Comparando os resultados, verifica-se que os valores médios de Rsk estão no intervalo de -1,48 até 0,10 após o brunimento convencional e entre -3,92 e -1,02 após o brunimento flexível. Os experimentos 3 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual no fator de assimetria Rsk entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 143,2% e 1083,4%, respectivamente. Nota-se, ainda, que a dispersão dos valores médios de Rsk nos 12 experimentos não apresentou melhora após o brunimento flexível, ou seja, a repetibilidade mostrou-se independente das condições de usinagem.

Em relação aos valores de incerteza expandida associados ao parâmetro Rsk , observa-se na Fig. 4.25 que são maiores após o brunimento flexível para 69,4% dos cilindros, e as barras de erros encontram-se parcialmente superpostas apenas para os blocos 2 (experimento 1), 17 (experimento 3) e 18 (experimento 5). Não foi verificada nenhuma tendência definida para a incerteza após o brunimento flexível.

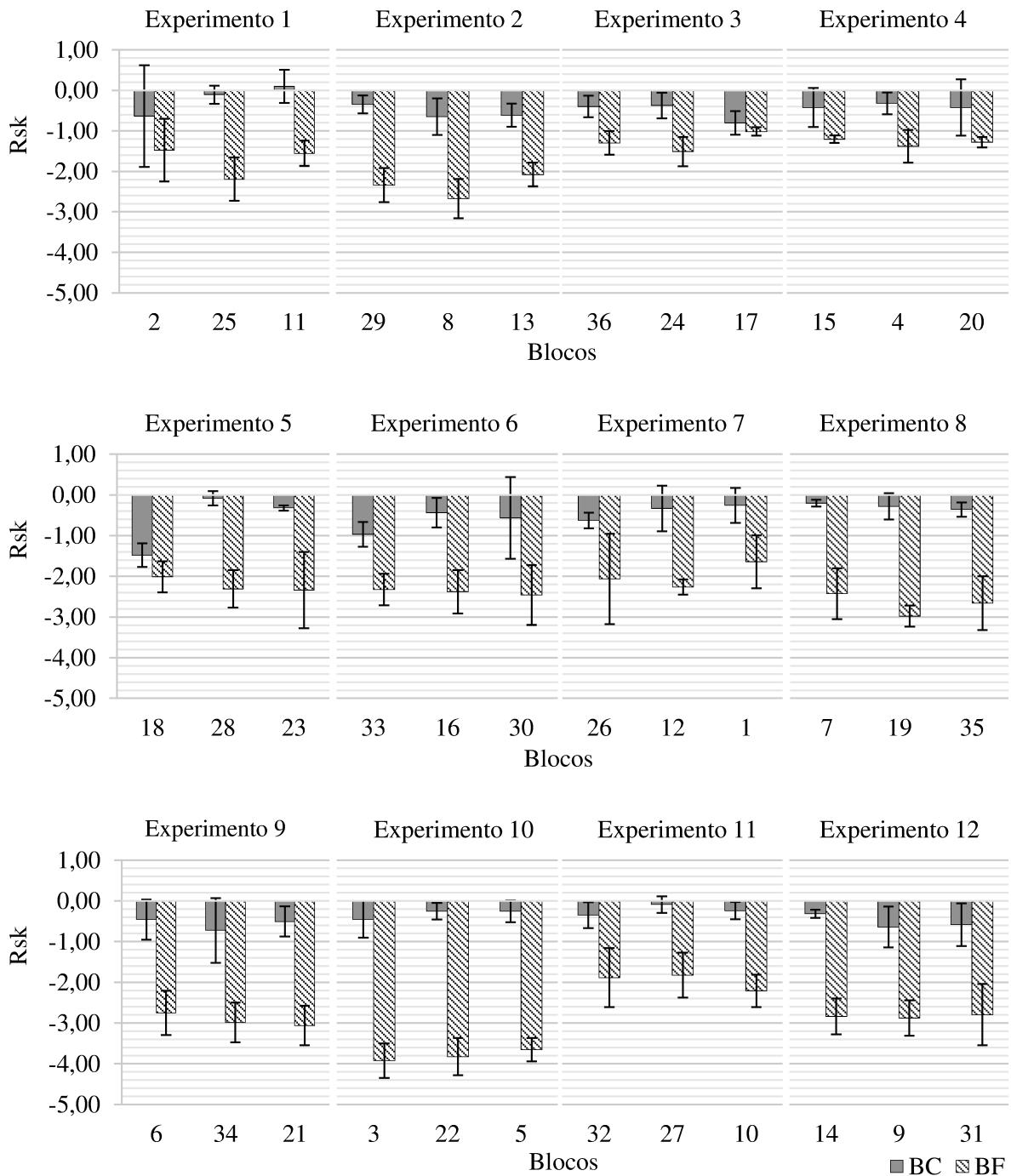


Figura 4.25 - Valores médios do parâmetro R_{sk} para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A Figura 4.26 mostra o histograma obtido durante a aplicação do método de MC na avaliação da incerteza de medição de R_{sk} para o cilindro do bloco 30 (experimento 6) após o brunimento flexível.

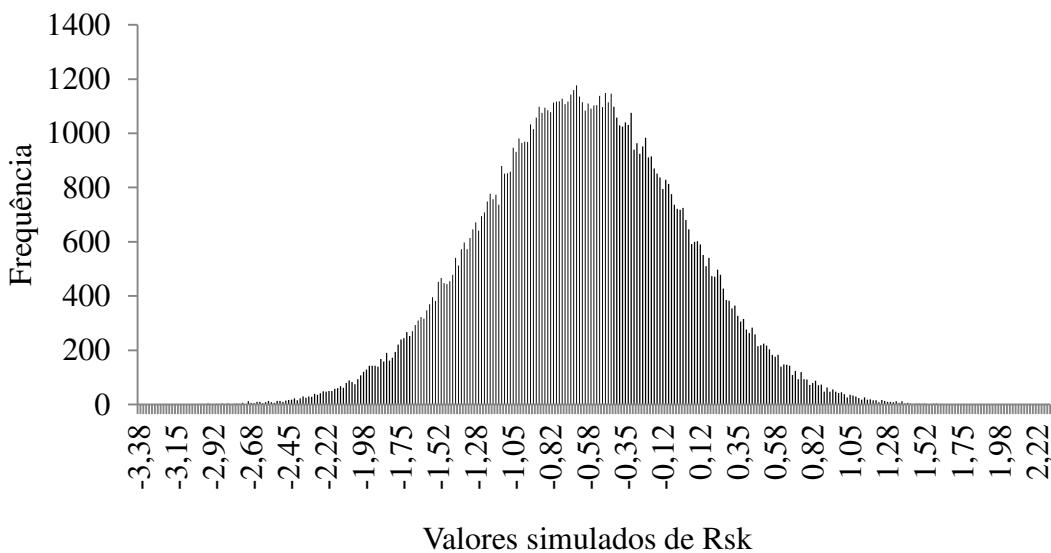


Figura 4.26 - Histograma da função densidade de probabilidade do parâmetro de rugosidade Rsk referente ao cilindro do bloco 30 usinado pelo brunimento flexível.

De acordo com a Fig. 4.26 verifica-se que a distribuição dos valores de Rsk , simulados pelo método de MC possui um formato próximo da distribuição normal. Histogramas similares foram obtidos para Rsk em todas as posições de medição e para todos os blocos.

O valor negativo observado para Rsk aponta que a superfície é caracterizada por sulcos que servem como depósito para lubrificantes. Este valor negativo também indica que as superfícies são menos susceptíveis ao desgaste prematuro.

Como o parâmetro Rsk informa sobre o formato da curva de distribuição das amplitudes das irregularidades em relação à linha de referência no comprimento de avaliação, diferentes superfícies influenciam diretamente na variabilidade dos valores obtidos para este parâmetro.

Na Figura 4.27 são apresentados os valores médios do Rsk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Observou-se que os cilindros do experimento 10 apresentaram os menores valores de Rsk e os cilindros do experimento 3 mostraram os maiores valores.

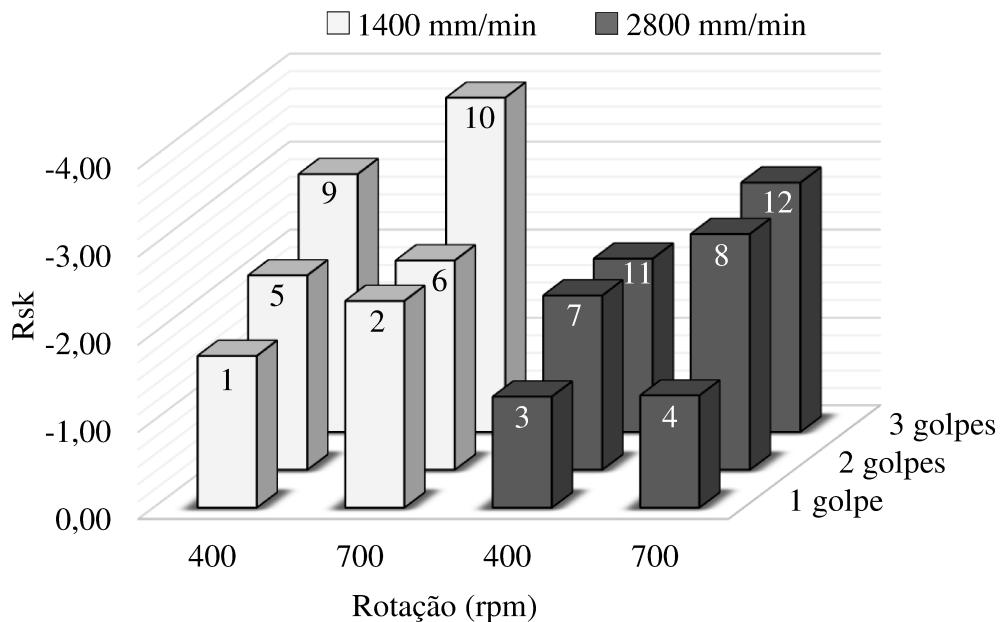


Figura 4.27 - Valores médios do parâmetro Rsk para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rsk é apresentado na Tab. 4.22. Os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA) e rotação (ROT), utilizados no brunimento flexível dos cilindros, produziram efeitos significativos na variável resposta Rsk . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da velocidade de avanço e da rotação da ferramenta.

Tabela 4.22 - ANOVA do parâmetro Rsk de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	8,92552	1	8,925521	73,51812	0,000000	-1,21967
VA	2,87981	1	2,879809	23,72054	0,000040	0,56567
ROT	2,61685	1	2,616845	21,55455	0,000074	-0,53922
NG x VA	0,05491	1	0,054913	0,45231	0,506754	0,09567
NG x ROT	0,44936	1	0,449361	3,70131	0,064590	-0,27367
VA x ROT	0,00179	1	0,001792	0,01476	0,904166	0,01411
Erro	3,39936	28	0,121406			

Como foi apresentado na Fig. 4.27, os cilindros do experimento 10 mostraram os menores valores de Rsk , devido ao aumento do número de golpes e da rotação da ferramenta,

bem como a utilização de baixa velocidade de avanço. O histograma exibido na Fig. 4,15a mostra que a distribuição das alturas estava mais homogênea na superfície usinada pelo brunimento convencional. Com o decorrer dos experimentos, esta distribuição ficou cada vez mais concentrada, próxima da região de contato, Fig. 4,15b. Apesar de considerar que o critério para entendimento da superfície para o parâmetro Rsk é diretamente a modificação da inclinação da distribuição normal para o lado negativo ou positivo dependendo da distribuição da área de contato, o histograma apresenta a maior concentração da área na região de contato entre as superfícies.

Na medida em que aumentou o número de golpes da ferramenta, o valor do Rsk torna-se mais negativo e a uma parcela importante da área real de contato passa a ser o contato entre as superfícies como pode ser evidenciado na Fig. 4.16 através do aumento do valor da concentração de iniciais 25% na superfície da Fig. 4.16a em um ponto próximo a região de contato, para aproximadamente 45% na superfície da Fig. 4.16b.

Conclui-se então, que o brunimento flexível reduziu de maneira significativa em até 1083,4% os valores médios de Rsk , acentuando as características descritas acima. Esta característica é desejada, visto que a retenção de lubrificante na superfície do cilindro reduz o atrito deste com a superfície do pistão, aumentando a eficiência e diminuindo o desgaste. Assim, o brunimento flexível produz uma superfície plataformica intensificando a distribuição de mais vales do que picos, evidenciado através da redução dos valores negativos de Rsk .

4.2.13. Fator de achatamento do perfil de rugosidade (Rku)

A Figura 4.28 mostra os valores médios de Rku dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%). Ainda, são exibidos no APÊNDICE XIII, o valor médio, o desvio-padrão (68,27%) e a incerteza expandida (95%) obtidos durante a simulação de MC para todos os blocos após ambos os processos de brunimento.

A partir da Fig. 4.28, os valores médios de Rku apresentaram um aumento após o brunimento flexível, com exceção dos blocos 2, 17, 20 e 18, e verifica-se que estão no intervalo de 3,65 até 12,87 após o brunimento convencional e entre 6,02 e 29,12 após o brunimento flexível. Os experimentos 4 e 10 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual no fator de achatamento Rku entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 12,1% e 476,1%, respectivamente. Observa-se, ainda, que a dispersão dos valores médios de Rku nos 12 experimentos não apresentou

melhora após o brunimento flexível, ou seja, a repetibilidade mostrou-se independente das condições de usinagem.

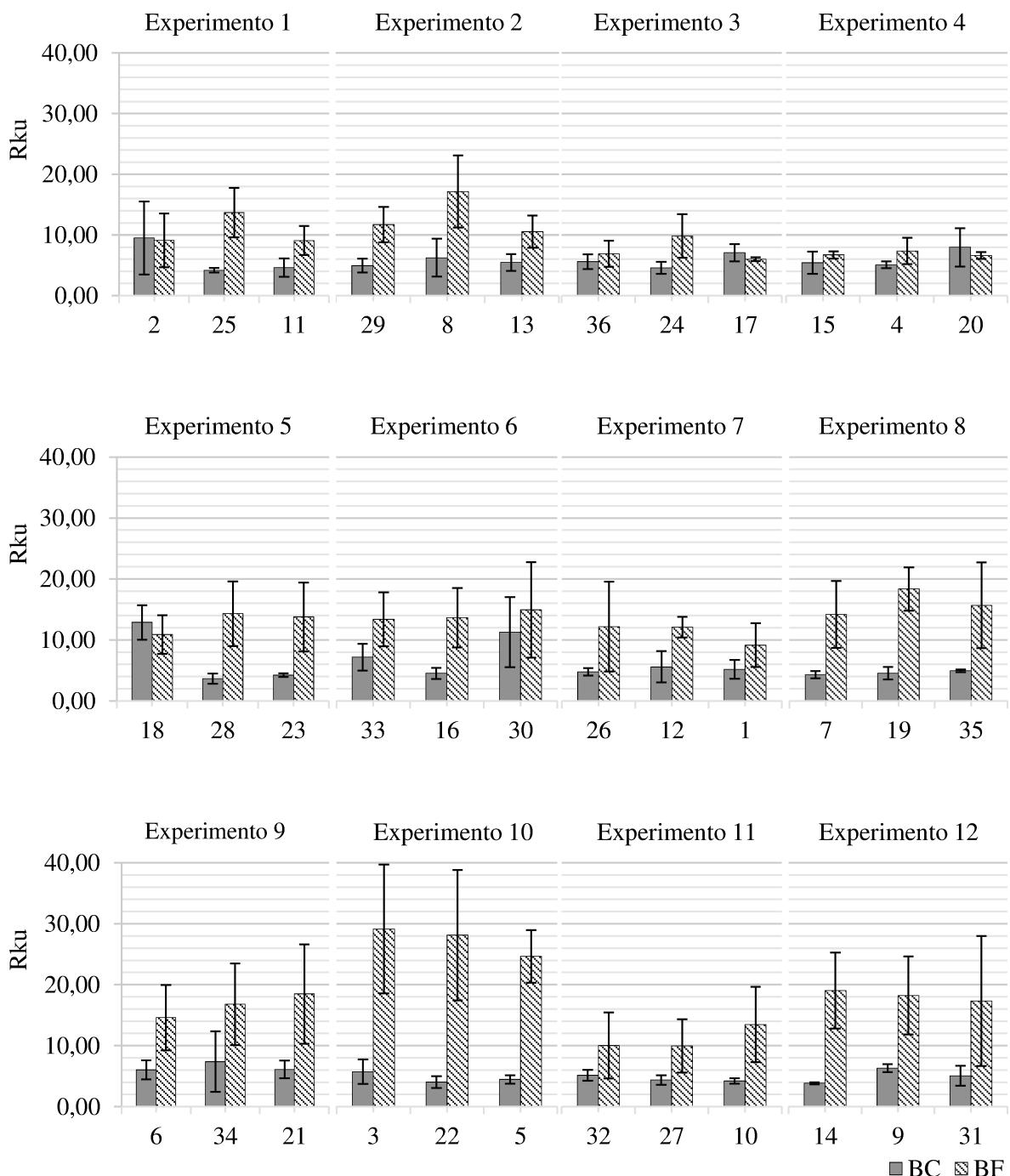


Figura 4.28 - Valores médios do parâmetro R_{ku} para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

De acordo com a Fig. 4.28, a incerteza expandida apresentou valores entre 0,21 e 6,01 após o brunimento convencional, e entre 0,31 e 10,69 após o brunimento flexível. Ainda, verifica-se que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Rku após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas para 38,9% dos blocos. A incerteza expandida apresentou valores maiores após o brunimento flexível para todos os cilindros, com exceção dos blocos 2, 17, 15, 20 e 12.

Na Figura 4.29 são apresentados os valores médios do Rku para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível. Verifica-se que os cilindros do experimento 10 apresentaram os maiores valores de Rku e os cilindros do experimento 4 mostraram os menores valores.

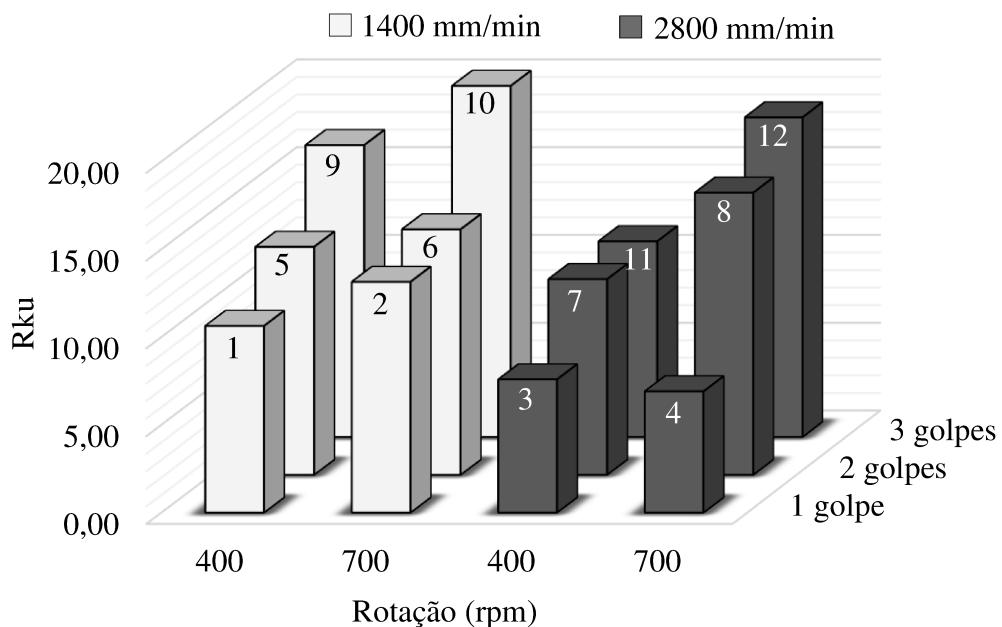


Figura 4.29 - Valores médios do parâmetro Rku para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

O quadro da ANOVA para a variável resposta Rku é apresentado na Tab. 4.23. Os fatores de controle número de golpes da ferramenta (NG), velocidade de avanço (VA), rotação (ROT) e a interação entre número de golpes e rotação ($NG \times ROT$), utilizados no brunimento flexível dos cilindros, produziram efeitos significativos na variável resposta Rku . Sendo o número de golpes da ferramenta o parâmetro de usinagem que produziu o maior efeito, seguido da rotação, da interação entre número de golpes e rotação e da velocidade de avanço.

Tabela 4.23 - ANOVA do parâmetro Rku de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	459,550	1	459,5500	62,22451	0,000000	8,75167
VA	139,216	1	139,2164	18,85034	0,000167	-3,93300
ROT	162,282	1	162,2821	21,97351	0,000065	4,24633
NG x VA	10,444	1	10,4438	1,41413	0,244359	-1,31933
NG x ROT	94,836	1	94,8356	12,84103	0,001268	3,97567
VA x ROT	2,063	1	2,0631	0,27934	0,601296	-0,47878
Erro	206,790	28	7,3854			

Os valores de Rku superiores a 3 indicam que as extremidades das reentrâncias tem o formato “afunilado”, ou “espetado”, ou seja, no perfil de rugosidade há relativamente muitos vales profundos.

Como foi apresentado na Fig. 4.29, os cilindros do experimento 10 mostraram os maiores valores de Rku , devido ao aumento do número de golpes (3 golpes) e da rotação da ferramenta (700 rpm), bem como a utilização de baixa velocidade de avanço (1400 rpm). Isto é justificado pela maior redução dos picos do perfil, permanecendo os vales profundos e isolados, ou seja, mais distante estará o valor do parâmetro Rku de 3 (distribuição de amplitude possui forma gaussiana). Na curva de *Abbott-Firestone* da Fig. 4.16, observa-se que ao aumentar o número de golpes a distribuição de amplitudes se diferencia mais da forma gaussiana.

Conclui-se que valores do parâmetro Rku maiores que 3 são características de superfícies do tipo platafórmica ou com presença de platôs, e os perfis passam a apresentar somente a existência de grandes vales. Portanto, o parâmetro Rku da mesma forma que o Rsk , comprova a característica de uma superfície brunida.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

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

- O brunimento flexível realizado 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 da altura destes, sem alterar a profundidade dos vales. Consequentemente, os valores dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rp , Rt , CV , Rk , Rpk e Rsk são reduzidos enquanto que os parâmetros Vo e Rku aumentam, 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.

- 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 significativos na maioria dos parâmetros de rugosidade avaliados.

- Os parâmetros médios de rugosidade Ra e Rq apresentaram menores valores com a combinação do aumento do número de golpes e da rotação da ferramenta com a diminuição da velocidade de avanço. Embora estes parâmetros não sejam capazes de caracterizar uma superfície brunida nos seus diferentes estágios de fabricação, eles devem ser avaliados, pois são muito utilizados nas indústrias e são apresentados na maioria dos trabalhos sobre o assunto, servindo para comparação dos resultados.

- Os parâmetros Rp , Rk e Rpk apresentaram menores valores para a superfície brunida com 3 golpes da ferramenta, rotação de 700 rpm e velocidade de avanço de 1400 mm/min. Estas condições de corte proporcionaram maior tempo de contato dos glóbulos abrasivos do brunidor flexível com a superfície do cilindro, ocasionando maior remoção de microcavacos, e a quebra dos picos do perfil de rugosidade com maior eficiência.

- A partir da combinação dos parâmetros Rp e Rt foi possível estimar 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. A redução do CV é indicativo da obtenção de superfícies mais lisas proporcionando um aumento da resistência ao desgaste e, consequentemente, maior eficiência do compressor.

- Em relação aos parâmetros Rsk e Rku , menores valores de velocidade de avanço e maiores valores de rotação e número de golpes da ferramenta promoveram valores negativos para o parâmetro Rsk e superiores a 3 para o parâmetro Rku , critérios estes que caracterizam superfícies do tipo plataforma ou com presença de platôs, ou seja, os perfis de rugosidade apresentam grandes vales.

- Os parâmetros Rv e Rvk indicaram que o brunidor flexível não altera a profundidade dos vales, independente dos parâmetros de corte utilizados. Já o parâmetro Vo aumentou a retenção de fluido lubrificante, devido à redução do $Mr2$ que representa o percentual de material determinado pela linha de intersecção que separa os vales da rugosidade central (Rk).

- A redução de Rt foi caracterizada pela remoção dos picos isolados da superfície do cilindro após o brunimento flexível. Entretanto, este parâmetro é fortemente influenciado pela presença de vales isolados, justificando a elevada dispersão de seus valores médios após o brunimento flexível, não sendo influenciado pelas condições de usinagem.

- Os parâmetros Ra , CV , Rsk , Rku , Rk , Rpk , Rvk e Vo , além da curva de *Abbott-Firestone*, foram os indicativos de maior significância para a caracterização das superfícies brunidas pelo processo convencional e flexível.

- 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. 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 à uma diminuição da produtividade e maior gasto com ferramentas de corte (brunidor flexível), horas-máquina, energia elétrica, horas-operador, e fluido refrigerante. Porém, quando comparado com outros processos de brunimento, o brunimento flexível constitui uma alternativa economicamente barata que pode ser executado em máquinas convencionais. A

questão relativa ao tempo de ciclo pode ser melhorada através da utilização de máquinas com maior número de estações.

CAPÍTULO VI

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

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

1. Efetuar a avaliação dos desvios de cilindricidade e de circularidade dos cilindros usinados pelo brunimento flexível com diferentes parâmetros de usinagem (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta).
2. Avaliar a qualidade geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível com diferentes fluidos de corte.
3. Avaliar a qualidade geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível com diferentes granulometrias do material abrasivo da ferramenta de corte.
4. Avaliar a possibilidade da substituição de uma das várias ferramentas utilizadas no brunimento convencional (desbaste, semiacabamento e acabamento) dos cilindros pelo brunidor flexível (*Flex Hone*).
5. 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.
6. Propor uma nova forma para avaliação da incerteza de medição dos parâmetros R_{sk} e R_{ku} , uma vez que por serem adimensionais devem ser tratados de forma diferente dos demais parâmetros de rugosidade.

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. 295 p.
- 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. **Brunitamento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. 2001. 76 f. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ARENÇIBIA R.V. FRANCO, S.D., DE MORAES, J.O. **Relatório de medição dos penetradores**. 2011. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM-ISO 1: Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento**. Rio de Janeiro, 1997. 2 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.
- BARTON, K.; HAASIS, G. **Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing.** Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 1993, 37 p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 100 - **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, 2008. 126 p.
- 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. 90 p.
- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Chapter 2 Surface roughness analysis and measurement techniques (2002). p. 49-120.
- BRM. **The Flex-Hone Tool**, Disponível em: < <http://www.brushresearch.com/flex-hone-tool.php> > Acesso em: 12 de janeiro de 2016.
- BRUNITEC. Disponível em :<www.brunitec.com.br> Acesso em: 22 fev. 2016.
- 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, abr. 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 surface 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 and Manufacture**, v. 50, p. 621-629, mar. 2010.
- COSTA, M. V. A. **Avaliação da Incerteza de Medição da Rugosidade Utilizando o Método de Monte Carlo**. 2012. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V, **DIN 8580: Manufacturing Process - Terms and Definitions**. Germany, 2003.
- 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. **Curso Orientador de Aplicação**. Joinville, 1987. 117p.
- EMBRACO. **Compressores Herméticos - Aspectos Gerais**. Material de Treinamento. Joinville, 1990.
- EMBRACO. **Desafios da Engenharia Mecânica: Uma Visão Industrial**, Joinville, 2012. 36p.
- FENG, C.; WANG, X.; YU, Z. Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 21.5, p. 395-408, 2002.
- 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.
- HAITJEMA, H.; MOREL, M. A. A. Accurate roughness measurements by dynamic Calibration. VFM-uncertainty calculations and a special calibration specimen, **Journal of Physics: Conference Series**, v. 13, p. 232–235, 2005.
- HAITJEMA, H. Uncertainty analysis of roughness standard calibration using stylus instruments. **Precision Engineering**, v. 22, p. 110-119, 1998.
- HENKLEIN, P. **Análise de ensaios de desempenho de compressores herméticos durante o transitório**. 2006. 136 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 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.
- INMETRO, **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. Rio de Janeiro, Brasil, 2012, 95 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13565-2: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve**. 1996. 6 p.

- 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.
- JUNIOR, M. F. R. **Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna**. 2009. 65 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding Honing and Lapping**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, p. 302-337.
- KRAR, S. F.; RATTERMAN, E. **Superabrasives: Grinding and Machining With CBN and Diamond**. New York: McGraw-Hill, 1990, p. 128-139.
- LEACH, R. **Measurement Good Practice guide: The measurement of surface texture using stylus instrument**. United Kingdom, 2001.
- 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.
- 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.
- MACHADO, G. A. A. **Brunitamento 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.
- MARINESCU, Ioan D. et al. **Tribology of abrasive machining processes**. 2. ed. Waltham: Elsevier Inc, 2013, 586 p.
- MILLER, M. **Flexible Honing: A Study of Cylinder Wall Microstructure**, Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 1993, 9 p.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**, Fourth ED., Wiley, New York. 2001.
- NAGEL. **Precidor Tools**. Disponível em :<<http://www.nagel.com/en/honing-tools/precidortools>> Acesso em: 23 mar. 2016.
- NETO, B. de B., SCARMINIO, I. S. e 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. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica.** ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo. Brasil. 1994. 119p.
- 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.
- PIRATELLI FILHO, A.; DI GIACOMO, B. Uncertainty evaluation in small angle calibration using ISO GUM approach and Monte Carlo Method. **XVII IMEKO World Congress Metrology** in the 3rd MILLenium. June 22-27, Dubrovnik, Croatia. 2003.
- PIRATELLI FILHO, A.; **Rugosidade superficial. Palestra.** 3 Seminário de metrologia. 2011.
- POON, C. Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. **Wear**, v. 190, p. 76-88, 1995.
- RECABARREN, Rodrigo Adrian Pizarro. **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/Catalogos/Portugues/cat_discovery_po_ai.pdf> Acesso em: 21 jun. 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.
- SABRI, L.; EL MANSORI, M. E. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. **Journal of Surface & Coatings Technology**. v. 204, p. 1046-1050, 2009.
- 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.
- SMITH, G. T. **Industrial metrology: Surfaces and Roundness.** London: Springer, 2002, 352 p.
- STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 371 p.
- STOUT, K. J. **Developments of methods for the characterization of roughness in three dimensions.** Penton Press, London, 2000.
- TAYLOR HOBSON. **Surface Finish Metrology.** 2003. 329 slides.
- TAYLOR HOBSON. **Guide to Surface Texture Parameters.** 2000.
- VERTEC. **Manual Flex-Hone**, Disponível em: < www.vertec.com.br/Produtos/flex_hone.pdf > Acesso em: 17 de janeiro de 2016.
- VISQUE, E. J. **Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Brunitimento.** 1998. 77 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - 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. 163-175, 2014.
- ZIPIN, R. B. Analysis of the R_k surface roughness parameter proposals. **Precision Engineering**, v. 12, p. 106-108, 1990.

APÊNDICE I - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

	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

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

	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 \pm 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: R4996/13

Incerteza expandida: 0,3 °C para k = 2,00 e 95% de abrangência

Tipo: Desempeno de Granito

Fabricante: Mitutoyo

Capacidade: 1000 x 1000 mm

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	0,005		

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

APÊNDICE I (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
0,02	2,23	

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

APÊNDICE II - 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 brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitamento Convencional			Brunitamento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,19	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	25	0,20	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	11	0,19	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
2	29	0,21	0,02	0,03	0,13	0,01	0,03
	8	0,19	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	13	0,16	0,01	0,03	0,11	0,00	0,03
3	36	0,19	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
	24	0,20	0,01	0,03	0,15	0,01	0,03
	17	0,16	0,02	0,03	0,13	0,01	0,03
4	15	0,20	0,01	0,03	0,14	0,01	0,03
	4	0,18	0,01	0,03	0,15	0,01	0,03
	20	0,17	0,01	0,03	0,13	0,01	0,03
5	18	0,19	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	28	0,17	0,01	0,03	0,12	0,01	0,03
	23	0,18	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
6	33	0,18	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
	16	0,19	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	30	0,19	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
7	26	0,18	0,01	0,03	0,12	0,01	0,03
	12	0,17	0,01	0,03	0,12	0,01	0,03
	1	0,17	0,01	0,03	0,12	0,00	0,03
8	7	0,18	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	19	0,20	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
	35	0,19	0,00	0,03	0,11	0,00	0,03
9	6	0,17	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
	34	0,20	0,02	0,03	0,10	0,00	0,03
	21	0,19	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03
10	3	0,19	0,01	0,03	0,08	0,01	0,03
	22	0,18	0,01	0,03	0,08	0,00	0,03
	5	0,18	0,01	0,03	0,08	0,01	0,03
11	32	0,19	0,01	0,03	0,11	0,00	0,03
	27	0,14	0,01	0,03	0,09	0,01	0,03
	10	0,18	0,02	0,03	0,10	0,01	0,03
12	14	0,19	0,01	0,03	0,09	0,01	0,03
	9	0,19	0,01	0,03	0,10	0,01	0,03
	31	0,18	0,01	0,03	0,11	0,01	0,03

APÊNDICE III - 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 brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitamento Convencional			Brunitamento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,26	0,02	0,04	0,18	0,02	0,03
	25	0,27	0,01	0,03	0,19	0,02	0,03
	11	0,25	0,01	0,03	0,18	0,01	0,03
2	29	0,28	0,03	0,05	0,19	0,02	0,03
	8	0,26	0,03	0,04	0,19	0,02	0,03
	13	0,21	0,01	0,03	0,16	0,01	0,03
3	36	0,25	0,02	0,03	0,18	0,01	0,03
	24	0,26	0,01	0,03	0,20	0,01	0,03
	17	0,21	0,02	0,03	0,17	0,02	0,03
4	15	0,26	0,01	0,03	0,19	0,01	0,03
	4	0,24	0,01	0,03	0,20	0,01	0,03
	20	0,23	0,02	0,03	0,18	0,01	0,03
5	18	0,25	0,01	0,03	0,16	0,02	0,04
	28	0,22	0,01	0,03	0,17	0,01	0,03
	23	0,23	0,02	0,03	0,16	0,02	0,03
6	33	0,24	0,01	0,03	0,15	0,01	0,03
	16	0,26	0,02	0,03	0,16	0,03	0,04
	30	0,27	0,03	0,04	0,15	0,01	0,03
7	26	0,24	0,01	0,03	0,17	0,02	0,03
	12	0,23	0,01	0,03	0,18	0,01	0,03
	1	0,23	0,02	0,03	0,17	0,01	0,03
8	7	0,24	0,01	0,03	0,16	0,01	0,03
	19	0,26	0,02	0,03	0,16	0,02	0,03
	35	0,25	0,00	0,03	0,16	0,01	0,03
9	6	0,23	0,02	0,03	0,16	0,02	0,03
	34	0,27	0,02	0,04	0,16	0,01	0,03
	21	0,25	0,01	0,03	0,16	0,02	0,03
10	3	0,25	0,02	0,03	0,14	0,01	0,03
	22	0,24	0,02	0,03	0,13	0,01	0,03
	5	0,24	0,02	0,03	0,13	0,02	0,03
11	32	0,25	0,01	0,03	0,15	0,01	0,03
	27	0,19	0,01	0,03	0,14	0,01	0,03
	10	0,24	0,02	0,03	0,14	0,01	0,03
12	14	0,25	0,01	0,03	0,14	0,02	0,03
	9	0,25	0,02	0,03	0,15	0,02	0,03
	31	0,24	0,01	0,03	0,16	0,01	0,03

APÊNDICE IV - 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 brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitamento Convencional			Brunitamento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,81	0,07	0,09	0,37	0,02	0,03
	25	0,89	0,11	0,15	0,37	0,03	0,04
	11	0,87	0,18	0,23	0,38	0,04	0,05
2	29	0,89	0,22	0,28	0,34	0,05	0,07
	8	0,80	0,18	0,23	0,32	0,03	0,04
	13	0,60	0,04	0,06	0,31	0,02	0,04
3	36	0,81	0,11	0,14	0,46	0,04	0,06
	24	0,79	0,13	0,17	0,46	0,07	0,10
	17	0,67	0,08	0,11	0,40	0,05	0,07
4	15	0,79	0,03	0,05	0,40	0,04	0,06
	4	0,79	0,07	0,09	0,43	0,06	0,08
	20	0,87	0,12	0,15	0,41	0,02	0,03
5	18	0,64	0,07	0,09	0,31	0,03	0,05
	28	0,69	0,04	0,05	0,34	0,02	0,04
	23	0,70	0,04	0,05	0,36	0,05	0,07
6	33	0,65	0,04	0,05	0,26	0,02	0,04
	16	0,73	0,05	0,06	0,28	0,04	0,06
	30	0,92	0,11	0,15	0,26	0,02	0,04
7	26	0,71	0,02	0,04	0,36	0,04	0,06
	12	0,70	0,07	0,10	0,33	0,01	0,03
	1	0,77	0,10	0,13	0,34	0,03	0,04
8	7	0,77	0,09	0,12	0,26	0,05	0,06
	19	0,80	0,07	0,09	0,24	0,03	0,04
	35	0,82	0,04	0,06	0,27	0,02	0,04
9	6	0,74	0,05	0,07	0,28	0,04	0,06
	34	0,90	0,16	0,20	0,26	0,03	0,04
	21	0,81	0,12	0,16	0,26	0,02	0,03
10	3	0,81	0,03	0,04	0,23	0,01	0,03
	22	0,70	0,07	0,09	0,21	0,03	0,04
	5	0,77	0,12	0,16	0,20	0,03	0,05
11	32	0,80	0,12	0,15	0,28	0,01	0,03
	27	0,64	0,06	0,08	0,27	0,02	0,03
	10	0,78	0,08	0,10	0,28	0,03	0,04
12	14	0,75	0,07	0,09	0,26	0,03	0,05
	9	0,75	0,05	0,06	0,25	0,03	0,05
	31	0,72	0,10	0,13	0,27	0,02	0,04

APÊNDICE V - 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 brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitamento Convencional			Brunitamento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	1,03	0,30	0,38	0,84	0,21	0,27
	25	0,95	0,04	0,06	1,07	0,25	0,31
	11	0,82	0,14	0,19	0,94	0,08	0,10
2	29	1,01	0,18	0,23	0,97	0,07	0,09
	8	1,31	0,39	0,49	1,22	0,23	0,29
	13	0,89	0,13	0,17	0,91	0,13	0,16
3	36	1,04	0,14	0,19	0,86	0,08	0,11
	24	0,92	0,16	0,21	1,07	0,18	0,23
	17	0,87	0,05	0,07	0,82	0,11	0,15
4	15	1,01	0,21	0,27	0,93	0,04	0,05
	4	0,95	0,11	0,14	0,99	0,13	0,17
	20	0,97	0,18	0,23	0,86	0,04	0,05
5	18	1,34	0,11	0,15	1,30	0,19	0,24
	28	0,75	0,16	0,21	0,96	0,09	0,12
	23	0,90	0,05	0,06	0,93	0,20	0,25
6	33	1,18	0,11	0,15	0,94	0,12	0,15
	16	0,99	0,20	0,26	0,93	0,18	0,23
	30	1,18	0,37	0,47	0,92	0,17	0,22
7	26	1,03	0,15	0,20	0,91	0,27	0,35
	12	0,87	0,17	0,21	1,06	0,10	0,14
	1	0,87	0,13	0,17	0,88	0,21	0,27
8	7	0,85	0,07	0,09	0,95	0,18	0,23
	19	0,87	0,12	0,16	0,93	0,12	0,16
	35	1,04	0,06	0,08	0,94	0,12	0,15
9	6	0,95	0,22	0,28	0,97	0,12	0,16
	34	1,22	0,29	0,37	1,01	0,08	0,10
	21	0,99	0,04	0,06	0,96	0,13	0,17
10	3	0,98	0,13	0,17	0,97	0,08	0,10
	22	0,81	0,16	0,21	0,96	0,08	0,12
	5	0,88	0,10	0,14	1,03	0,11	0,14
11	32	0,98	0,15	0,19	0,80	0,17	0,22
	27	0,66	0,14	0,18	0,71	0,07	0,10
	10	0,88	0,09	0,12	0,79	0,14	0,18
12	14	0,93	0,04	0,05	0,86	0,21	0,26
	9	1,18	0,21	0,26	0,98	0,16	0,21
	31	0,96	0,16	0,20	0,92	0,18	0,23

APÊNDICE VI - ALTURA TOTAL DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_t)

Valor médio, desvio-padrão (68,27%) e incerteza expandida (95%) associada ao parâmetro R_t para todos os cilindros usinados pelo brunitimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitimento Convencional			Brunitimento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	2,70	0,56	0,70	1,77	0,32	0,40
	25	2,53	0,48	0,60	2,16	0,30	0,38
	11	2,50	0,76	0,95	1,91	0,17	0,22
2	29	2,52	0,30	0,39	1,94	0,34	0,43
	8	3,28	0,17	0,22	2,12	0,58	0,72
	13	2,04	0,53	0,66	1,38	0,15	0,19
3	36	2,34	0,19	0,25	1,66	0,21	0,27
	24	2,22	0,46	0,58	2,05	0,27	0,35
	17	2,34	0,25	0,32	1,82	0,21	0,27
4	15	2,32	0,32	0,40	1,67	0,12	0,16
	4	2,55	0,31	0,40	2,09	0,29	0,37
	20	2,69	0,50	0,63	1,58	0,09	0,12
5	18	3,09	0,24	0,31	1,89	0,19	0,25
	28	2,02	0,38	0,48	1,88	0,26	0,33
	23	2,32	0,36	0,46	1,79	0,21	0,27
6	33	2,60	0,18	0,24	1,70	0,32	0,41
	16	1,92	0,21	0,27	1,86	0,40	0,50
	30	3,29	0,91	1,14	1,60	0,37	0,47
7	26	2,03	0,10	0,13	1,76	0,31	0,39
	12	2,06	0,31	0,40	1,89	0,38	0,48
	1	2,22	0,35	0,44	1,66	0,26	0,33
8	7	2,17	0,27	0,34	1,90	0,41	0,52
	19	2,18	0,18	0,23	1,76	0,17	0,22
	35	2,43	0,12	0,15	1,84	0,25	0,32
9	6	2,22	0,41	0,52	1,66	0,16	0,21
	34	2,72	0,40	0,50	1,78	0,15	0,19
	21	2,39	0,26	0,33	1,80	0,29	0,37
10	3	2,22	0,26	0,33	2,02	0,40	0,50
	22	2,11	0,54	0,67	1,67	0,35	0,44
	5	2,44	0,66	0,83	1,66	0,17	0,22
11	32	2,23	0,22	0,28	1,82	0,40	0,51
	27	1,74	0,29	0,37	1,62	0,53	0,66
	10	2,01	0,11	0,14	1,74	0,34	0,43
12	14	2,05	0,17	0,22	1,70	0,24	0,31
	9	2,62	0,21	0,28	1,73	0,29	0,37
	31	2,20	0,37	0,47	1,61	0,41	0,52

APÊNDICE VII - 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 brunitimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitimento Convencional			Brunitimento Flexível		
		\bar{x}	s	U	\bar{x}	s	U
1	2	0,31	0,09	0,12	0,21	0,04	0,07
	25	0,36	0,07	0,11	0,17	0,02	0,04
	11	0,37	0,10	0,16	0,20	0,03	0,04
2	29	0,35	0,07	0,13	0,18	0,04	0,07
	8	0,24	0,04	0,08	0,16	0,04	0,07
	13	0,30	0,05	0,10	0,22	0,02	0,04
3	36	0,35	0,04	0,07	0,28	0,04	0,06
	24	0,36	0,03	0,10	0,23	0,06	0,08
	17	0,29	0,05	0,07	0,22	0,04	0,06
4	15	0,35	0,06	0,09	0,24	0,01	0,04
	4	0,32	0,04	0,07	0,21	0,04	0,06
	20	0,34	0,09	0,12	0,26	0,01	0,03
5	18	0,21	0,02	0,04	0,17	0,03	0,05
	28	0,35	0,06	0,10	0,18	0,02	0,04
	23	0,31	0,05	0,08	0,20	0,01	0,04
6	33	0,25	0,02	0,03	0,16	0,03	0,05
	16	0,38	0,05	0,07	0,16	0,04	0,06
	30	0,30	0,08	0,12	0,17	0,04	0,07
7	26	0,35	0,03	0,04	0,21	0,05	0,07
	12	0,34	0,06	0,09	0,18	0,04	0,06
	1	0,35	0,06	0,09	0,21	0,04	0,06
8	7	0,35	0,03	0,07	0,14	0,02	0,05
	19	0,37	0,03	0,06	0,14	0,01	0,03
	35	0,34	0,03	0,04	0,15	0,03	0,04
9	6	0,34	0,08	0,11	0,17	0,02	0,04
	34	0,33	0,06	0,10	0,14	0,00	0,03
	21	0,34	0,04	0,08	0,15	0,02	0,04
10	3	0,37	0,04	0,07	0,12	0,02	0,04
	22	0,34	0,05	0,11	0,13	0,01	0,04
	5	0,33	0,07	0,12	0,12	0,01	0,03
11	32	0,36	0,03	0,08	0,16	0,03	0,05
	27	0,37	0,05	0,09	0,18	0,04	0,08
	10	0,39	0,03	0,06	0,17	0,04	0,06
12	14	0,37	0,04	0,06	0,16	0,05	0,06
	9	0,29	0,01	0,04	0,15	0,04	0,05
	31	0,33	0,06	0,10	0,18	0,05	0,08

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 brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunitamento Convencional			Brunitamento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,58	0,02	0,04	0,38	0,04	0,05
	25	0,69	0,03	0,05	0,37	0,02	0,03
	11	0,63	0,09	0,13	0,41	0,01	0,03
2	29	0,64	0,04	0,06	0,36	0,06	0,08
	8	0,59	0,05	0,07	0,37	0,05	0,06
	13	0,49	0,01	0,03	0,29	0,03	0,04
3	36	0,58	0,02	0,04	0,39	0,02	0,03
	24	0,64	0,03	0,05	0,47	0,01	0,03
	17	0,52	0,06	0,08	0,42	0,03	0,05
4	15	0,66	0,05	0,07	0,39	0,03	0,04
	4	0,59	0,02	0,03	0,43	0,03	0,04
	20	0,56	0,07	0,09	0,40	0,02	0,03
5	18	0,60	0,05	0,07	0,29	0,02	0,04
	28	0,61	0,05	0,07	0,31	0,02	0,03
	23	0,61	0,04	0,05	0,30	0,03	0,04
6	33	0,58	0,06	0,08	0,30	0,03	0,04
	16	0,60	0,05	0,06	0,31	0,02	0,04
	30	0,58	0,04	0,05	0,28	0,04	0,06
7	26	0,62	0,04	0,06	0,32	0,02	0,03
	12	0,58	0,04	0,06	0,33	0,02	0,03
	1	0,57	0,02	0,04	0,34	0,01	0,03
8	7	0,60	0,02	0,04	0,30	0,06	0,08
	19	0,66	0,07	0,10	0,28	0,05	0,06
	35	0,60	0,03	0,04	0,29	0,03	0,05
9	6	0,55	0,05	0,07	0,26	0,03	0,05
	34	0,61	0,05	0,07	0,26	0,03	0,04
	21	0,63	0,06	0,08	0,26	0,03	0,04
10	3	0,60	0,03	0,05	0,22	0,02	0,03
	22	0,62	0,02	0,04	0,21	0,03	0,04
	5	0,58	0,02	0,04	0,22	0,03	0,04
11	32	0,62	0,03	0,04	0,30	0,04	0,05
	27	0,46	0,02	0,03	0,26	0,03	0,04
	10	0,61	0,06	0,08	0,27	0,03	0,04
12	14	0,64	0,05	0,07	0,24	0,03	0,04
	9	0,56	0,02	0,04	0,25	0,03	0,04
	31	0,56	0,02	0,04	0,24	0,02	0,03

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 brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,31	0,04	0,06	0,12	0,01	0,03
	25	0,33	0,04	0,06	0,12	0,01	0,03
	11	0,31	0,04	0,06	0,13	0,01	0,03
2	29	0,33	0,04	0,05	0,09	0,01	0,03
	8	0,25	0,08	0,11	0,10	0,01	0,03
	13	0,19	0,02	0,03	0,10	0,01	0,03
3	36	0,27	0,02	0,04	0,13	0,01	0,03
	24	0,26	0,03	0,05	0,14	0,02	0,03
	17	0,24	0,03	0,04	0,12	0,01	0,03
4	15	0,28	0,03	0,04	0,13	0,02	0,03
	4	0,27	0,02	0,04	0,13	0,01	0,03
	20	0,23	0,02	0,04	0,13	0,01	0,03
5	18	0,21	0,02	0,03	0,11	0,02	0,04
	28	0,24	0,04	0,06	0,12	0,03	0,04
	23	0,25	0,02	0,03	0,11	0,01	0,03
6	33	0,22	0,02	0,03	0,08	0,01	0,03
	16	0,26	0,02	0,04	0,09	0,02	0,03
	30	0,34	0,06	0,08	0,08	0,00	0,03
7	26	0,21	0,01	0,03	0,11	0,00	0,03
	12	0,24	0,04	0,06	0,09	0,00	0,03
	1	0,26	0,02	0,03	0,10	0,02	0,03
8	7	0,25	0,03	0,04	0,10	0,02	0,03
	19	0,27	0,03	0,04	0,09	0,00	0,03
	35	0,30	0,02	0,03	0,08	0,01	0,03
9	6	0,25	0,04	0,05	0,09	0,01	0,03
	34	0,33	0,11	0,14	0,09	0,02	0,03
	21	0,25	0,04	0,05	0,08	0,01	0,03
10	3	0,27	0,02	0,03	0,07	0,01	0,03
	22	0,22	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03
	5	0,27	0,08	0,10	0,06	0,01	0,03
11	32	0,30	0,07	0,09	0,08	0,01	0,03
	27	0,19	0,04	0,05	0,09	0,01	0,03
	10	0,26	0,04	0,06	0,09	0,00	0,03
12	14	0,27	0,03	0,05	0,09	0,01	0,03
	9	0,27	0,06	0,08	0,08	0,01	0,03
	31	0,24	0,06	0,07	0,08	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 brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
		\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	2	0,39	0,13	0,16	0,34	0,06	0,07
	25	0,38	0,05	0,07	0,37	0,07	0,09
	11	0,32	0,13	0,16	0,34	0,02	0,03
2	29	0,47	0,03	0,04	0,41	0,06	0,08
	8	0,41	0,08	0,11	0,42	0,04	0,06
	13	0,31	0,07	0,09	0,31	0,04	0,05
3	36	0,32	0,04	0,06	0,31	0,03	0,04
	24	0,40	0,07	0,10	0,37	0,03	0,04
	17	0,38	0,05	0,06	0,33	0,04	0,06
4	15	0,33	0,09	0,13	0,35	0,01	0,03
	4	0,39	0,06	0,08	0,40	0,05	0,07
	20	0,29	0,06	0,08	0,35	0,06	0,07
5	18	0,35	0,06	0,08	0,35	0,03	0,04
	28	0,31	0,04	0,06	0,35	0,05	0,07
	23	0,35	0,07	0,09	0,36	0,06	0,08
6	33	0,41	0,04	0,06	0,34	0,09	0,12
	16	0,41	0,09	0,12	0,39	0,12	0,16
	30	0,41	0,13	0,17	0,35	0,09	0,11
7	26	0,39	0,04	0,05	0,34	0,04	0,06
	12	0,31	0,07	0,10	0,38	0,07	0,09
	1	0,35	0,11	0,14	0,35	0,06	0,07
8	7	0,34	0,05	0,07	0,36	0,07	0,10
	19	0,33	0,03	0,05	0,35	0,05	0,07
	35	0,43	0,06	0,08	0,39	0,03	0,05
9	6	0,28	0,08	0,10	0,35	0,06	0,08
	34	0,40	0,09	0,12	0,40	0,02	0,04
	21	0,37	0,03	0,04	0,39	0,11	0,15
10	3	0,39	0,12	0,15	0,39	0,02	0,03
	22	0,36	0,07	0,10	0,33	0,06	0,08
	5	0,34	0,10	0,13	0,33	0,05	0,07
11	32	0,38	0,04	0,06	0,36	0,02	0,04
	27	0,25	0,04	0,05	0,30	0,03	0,04
	10	0,28	0,04	0,05	0,31	0,03	0,04
12	14	0,30	0,04	0,05	0,32	0,01	0,03
	9	0,41	0,05	0,06	0,36	0,03	0,05
	31	0,39	0,07	0,10	0,36	0,03	0,04

APÊNDICE XI - VOLUME DE RETENÇÃO DE ÓLEO (Vo)

Valor médio, desvio-padrão (68,27%) e incerteza expandida (95%) associada ao parâmetro Vo para todos os cilindros usinados pelo brunitamento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Ensaio	Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
		\bar{x} ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	s ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	U ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	\bar{x} ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	s ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	U ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)
1	2	0,025796	0,008738	0,010800	0,026483	0,006489	0,0080406
	25	0,024544	0,006714	0,008385	0,031580	0,007281	0,0091075
	11	0,018947	0,009879	0,012517	0,025795	0,002320	0,0045644
2	29	0,034480	0,004871	0,006431	0,039008	0,008865	0,0109394
	8	0,025667	0,004535	0,006116	0,032377	0,002237	0,0045359
	13	0,019486	0,007201	0,009023	0,025141	0,004333	0,0059541
3	36	0,018284	0,002474	0,004632	0,021904	0,002904	0,0048775
	24	0,025376	0,006411	0,007975	0,026898	0,003974	0,0056471
	17	0,023560	0,004825	0,006384	0,022623	0,003513	0,0052815
4	15	0,018332	0,007949	0,009700	0,029508	0,003196	0,0050726
	4	0,025721	0,006949	0,008588	0,029523	0,005345	0,0068688
	20	0,019761	0,004159	0,005790	0,026776	0,007601	0,0093903
5	18	0,020549	0,003064	0,004977	0,030637	0,003061	0,0049857
	28	0,018291	0,003938	0,005600	0,027575	0,005271	0,0068119
	23	0,020803	0,003660	0,005390	0,029723	0,006785	0,0084516
6	33	0,026038	0,003038	0,004963	0,027178	0,011414	0,0141433
	16	0,028784	0,004682	0,006253	0,031102	0,012212	0,0150019
	30	0,025685	0,010686	0,013370	0,030113	0,009652	0,0116991
7	26	0,025446	0,006987	0,008620	0,027927	0,004752	0,0063387
	12	0,020184	0,007023	0,008646	0,030864	0,005098	0,0066333
	1	0,022965	0,012328	0,015120	0,028110	0,005896	0,0074471
8	7	0,021886	0,004578	0,006140	0,031707	0,005678	0,0072822
	19	0,021215	0,002779	0,004802	0,030072	0,002809	0,0048303
	35	0,025775	0,003982	0,005650	0,033830	0,003524	0,0053042
9	6	0,016430	0,005199	0,006748	0,033114	0,006438	0,0080070
	34	0,025111	0,006889	0,008535	0,037516	0,002175	0,0045173
	21	0,021651	0,002925	0,004890	0,037944	0,012770	0,0156108
10	3	0,023810	0,003847	0,005537	0,033400	0,004818	0,0063927
	22	0,021566	0,004895	0,006431	0,026852	0,004953	0,0065245
	5	0,020399	0,007125	0,008957	0,027410	0,004460	0,0060689
11	32	0,023684	0,002394	0,004598	0,030234	0,002598	0,0047126
	27	0,014989	0,002947	0,004897	0,025864	0,004983	0,0065445
	10	0,018422	0,004290	0,005894	0,024265	0,002848	0,0048464
12	14	0,019175	0,003290	0,005124	0,028450	0,004894	0,0064380
	9	0,025236	0,003738	0,005451	0,030012	0,005433	0,0070050
	31	0,027795	0,006667	0,008349	0,034322	0,001790	0,0043551

APÊNDICE XII - FATOR DE ASSIMETRIA DO PERFIL (Rsk)

Valor médio, desvio-padrão (68,27%) e incerteza expandida (95%) associada ao parâmetro Rsk para todos os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
		\bar{x}	s	U	\bar{x}	s	U
1	2	-0,63	1,40	1,26	-1,48	0,87	0,78
	25	-0,11	0,25	0,23	-2,19	0,60	0,54
	11	0,10	0,46	0,41	-1,56	0,35	0,32
2	29	-0,35	0,25	0,23	-2,34	0,47	0,42
	8	-0,65	0,51	0,46	-2,67	0,54	0,49
	13	-0,61	0,32	0,29	-2,08	0,33	0,30
3	36	-0,40	0,30	0,27	-1,30	0,33	0,30
	24	-0,37	0,35	0,32	-1,51	0,40	0,36
	17	-0,80	0,32	0,30	-1,02	0,12	0,11
4	15	-0,42	0,54	0,49	-1,20	0,10	0,10
	4	-0,32	0,30	0,27	-1,38	0,45	0,41
	20	-0,42	0,78	0,70	-1,28	0,14	0,13
5	18	-1,48	0,33	0,30	-2,01	0,43	0,39
	28	-0,08	0,19	0,18	-2,31	0,51	0,46
	23	-0,32	0,07	0,07	-2,34	1,04	0,94
6	33	-0,97	0,34	0,31	-2,33	0,43	0,39
	16	-0,44	0,40	0,36	-2,38	0,59	0,54
	30	-0,57	1,12	1,01	-2,46	0,82	0,74
7	26	-0,63	0,21	0,19	-2,07	1,24	1,11
	12	-0,33	0,63	0,56	-2,27	0,21	0,19
	1	-0,26	0,48	0,43	-1,65	0,73	0,65
8	7	-0,20	0,09	0,09	-2,43	0,70	0,63
	19	-0,28	0,36	0,33	-2,98	0,28	0,26
	35	-0,36	0,20	0,18	-2,66	0,74	0,67
9	6	-0,46	0,55	0,50	-2,75	0,61	0,55
	34	-0,73	0,88	0,80	-2,99	0,55	0,49
	21	-0,51	0,41	0,38	-3,06	0,54	0,49
10	3	-0,45	0,51	0,46	-3,92	0,46	0,43
	22	-0,25	0,23	0,21	-3,83	0,50	0,46
	5	-0,26	0,30	0,27	-3,66	0,31	0,29
11	32	-0,35	0,36	0,32	-1,89	0,81	0,73
	27	-0,09	0,23	0,21	-1,83	0,62	0,56
	10	-0,24	0,24	0,22	-2,21	0,45	0,40
12	14	-0,31	0,11	0,11	-2,84	0,49	0,45
	9	-0,64	0,57	0,51	-2,88	0,49	0,44
	31	-0,59	0,59	0,53	-2,80	0,84	0,76

APÊNDICE XIII - FATOR DE ACHATAMENTO DO PERFIL (Rku)

Valor médio, desvio-padrão (68,27%) e incerteza expandida (95%) associada ao parâmetro Rku para todos os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas.

Experimento	Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
		\bar{x}	s	U	\bar{x}	s	U
1	2	9,52	6,71	6,01	9,12	4,94	4,45
	25	4,19	0,40	0,37	13,69	4,29	4,09
	11	4,61	1,71	1,54	9,09	2,67	2,40
2	29	4,96	1,29	1,16	11,73	3,14	2,92
	8	6,25	3,47	3,10	17,16	5,31	5,94
	13	5,48	1,54	1,39	10,54	2,79	2,67
3	36	5,60	1,35	1,21	6,91	2,40	2,15
	24	4,58	1,11	1,00	9,83	4,03	3,60
	17	7,07	1,59	1,43	6,02	0,33	0,31
4	15	5,41	2,05	1,84	6,72	0,68	0,62
	4	5,09	0,61	0,55	7,38	2,43	2,19
	20	7,97	3,55	3,18	6,61	0,62	0,57
5	18	12,87	3,13	2,82	10,89	3,30	3,16
	28	3,65	0,94	0,85	14,30	5,36	5,29
	23	4,24	0,36	0,33	13,76	5,62	5,63
6	33	7,17	2,43	2,18	13,38	3,45	4,41
	16	4,54	1,03	0,92	13,64	4,24	4,87
	30	11,28	6,46	5,78	14,92	7,14	7,83
7	26	4,77	0,71	0,64	12,19	8,10	7,37
	12	5,59	2,86	2,56	12,09	1,55	1,69
	1	5,19	1,73	1,55	9,15	3,98	3,59
8	7	4,30	0,67	0,61	14,18	4,91	5,51
	19	4,55	1,16	1,04	18,36	2,03	3,57
	35	4,95	0,23	0,21	15,67	6,09	7,03
9	6	6,04	1,73	1,56	14,60	4,56	5,36
	34	7,38	5,55	4,96	16,79	4,35	6,71
	21	6,09	1,63	1,46	18,48	6,06	8,15
10	3	5,72	2,22	2,00	29,12	7,47	10,56
	22	4,04	1,11	1,00	28,12	8,32	10,69
	5	4,46	0,78	0,70	24,64	2,69	4,32
11	32	5,15	0,99	0,89	10,01	5,97	5,43
	27	4,37	0,88	0,80	9,97	4,64	4,39
	10	4,20	0,49	0,44	13,46	5,42	6,18
12	14	3,83	0,17	0,15	19,04	5,39	6,22
	9	6,31	0,72	0,65	18,24	5,93	6,40
	31	5,06	1,83	1,64	17,34	9,03	10,67

ANEXO I - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 1/2



CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU

ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG

INTERESSADO : O mesmo

ENDEREÇO : O mesmo

INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital

FABRICANTE : Instrutherm

MODELO : HT-260

IDENTIFICAÇÃO : Não especificado

NÚMERO DE SÉRIE : 06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 **LOCAL DA CALIBRAÇÃO:** Laboratório Elus

PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente **TEMPERATURA DO AR :** 23°C ± 5°C

DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 **UMIDADE RELATIVA AR :** 45%UR a 70%UR

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.

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.

OBSEVAÇÕES :
- 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) / V_{eff} = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA



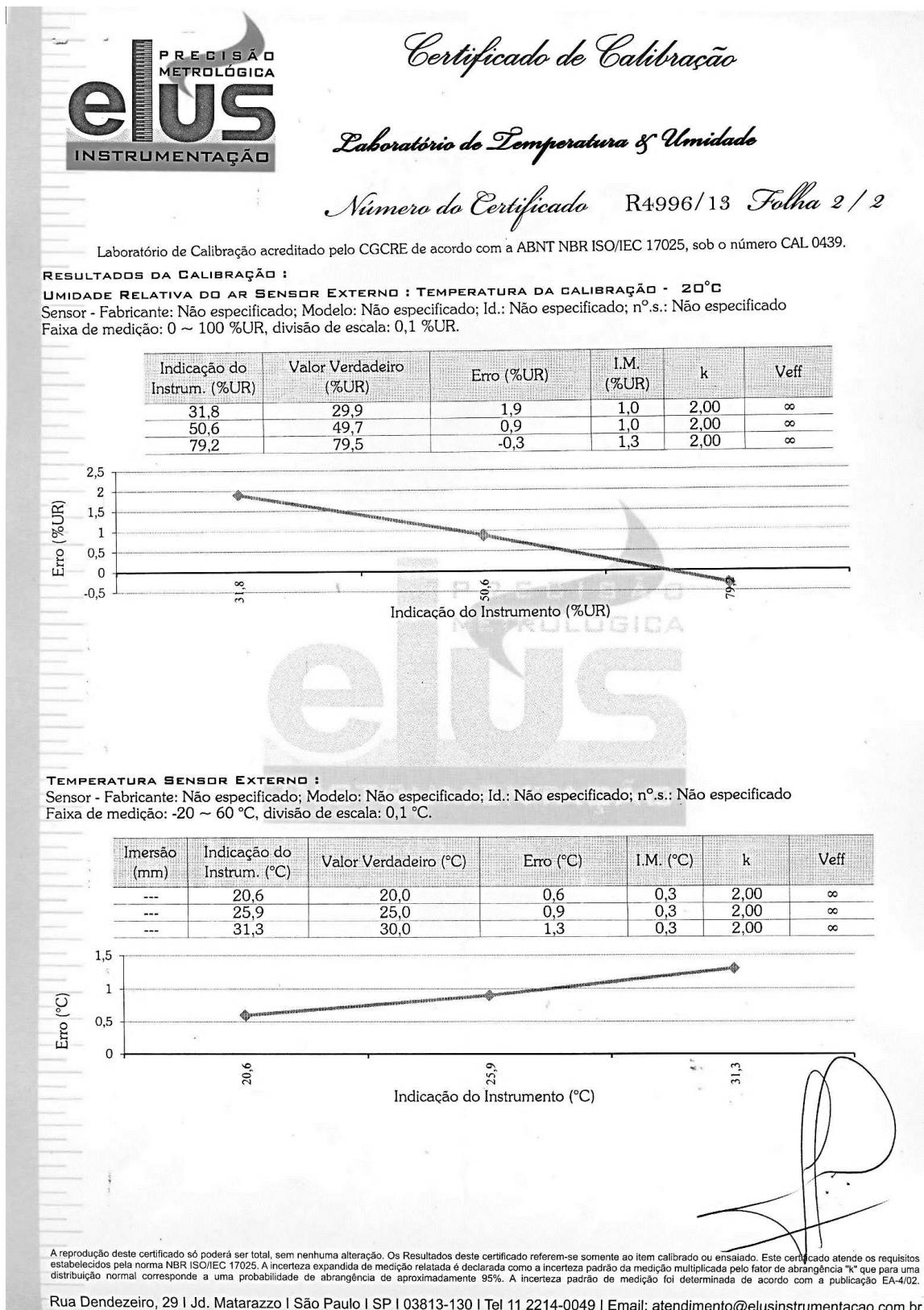
Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO GOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

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.

Rua Dendezeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

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



ANEXO II - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO DE RUGOSIDADE

Mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

Pág.:1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 15218/11

Cliente : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "
Endereço : Avenida Engenheiro Diniz, 1.178 - Uberlândia - MG

Ordem de serviço: 059.531

1 - Objeto Calibrado

PADRÃO DE RUGOSIDADE
Fabricante: Mitutoyo
Código: 178-604
Nº. de Série: 001031008
Valor Nominal: 0,38 μ mRA
Valor Nominal: 2,94 μ mRA
Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Padrão de rugosidade
Número: 131809
Certificado N°. DIMCI 1752/2010 - INMETRO
Validade: 09/2013

3 - Procedimento de Medição: ICM - 0077 Versão 1/0

O erro foi verificado comparativamente com padrão Mitutoyo e a leitura da indicação feita no aparelho

Condições de Medição:
Curso medido (L_t) = 4,5 mm Filtro = Gauss
Cut-off (λ_c) = 0,8mm

Data da Calibração: 04 de Novembro de 2011
Data da Emissão: 07 de Novembro de 2011

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto. de Garantia da Qualidade

Os resultados apresentados no presente Documento tem significação restrita e se aplicam somente à amostra ensaiada. A reprodução do Documento poderá ser feita integralmente sem nenhuma alteração. A MITUTOYO , declina-se de toda e qualquer responsabilidade por uso inadequado deste Certificado.

*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
*Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

**ANEXO II (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO
DE RUGOSIDADE**

Mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 15218/11

4 - Resultado da Medição: O resultado é a média das medições. Pág.: 2 / 2

Valor Nominal			
4 →	1 →	5	
3 →	→ 2		
Nº Série			

Posição	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)
1	0,37	1,41	1,45
2	0,40	1,67	1,81
3	0,39	1,48	1,58
4	0,38	1,54	1,49
5	0,37	1,43	1,48

Posição	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)
1	2,84	10,38	10,61
2	2,85	10,94	10,78
3	2,86	10,67	10,91
4	2,86	10,60	10,92
5	2,83	10,51	10,70

5 - Incerteza de Medição : $U = 6\%$

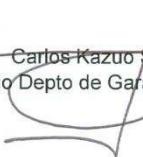
A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k= 2,65$, o qual para uma distribuição t com $V_{eff}= 5$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota : Temperatura ambiente ($20,0 \pm 0,5$) $^{\circ}C$.

*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO III - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO DESEMPENO DE GRANITO

 <p>Calibração NBR ISO/IEC 17025</p> <p>LABORATÓRIO DE METROLOGIA Mitutoyo Sul Americana</p> <p>Data da Calibração: 28.05.2013</p> <p>Nº Certificado 06994/13</p> <p>Nº do Instrumento / Padrão: 05906</p> <p>Data da próxima calibração: _____</p> <p>Preenchido pelo Cliente</p> <p>CAL 0031</p>	 <p>Calibração NBR ISO/IEC 17025</p> <p>a</p> <p>N</p> <p>CAL 0031</p>
<p>LABORATÓRIO DE METROLOGIA</p> <p>REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO</p> <p>Certificado de Calibração No. : 06994/13</p> <p>Cliente : " FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA. "</p> <p>Endereço : Av. Amazonas, 2210, Campus Umuarama, Uberlandia, MG - Cep-38400-902</p> <p>Ordem de Serviço No. : 035.766/002</p> <p>1 - INSTRUMENTO CALIBRADO</p> <p>Desempenho de Granito</p> <p>Fabricante : Mitutoyo</p> <p>Código : Sem identificação</p> <p>No. de Série : Sem identificação</p> <p>Capacidade : 1000 x 1000 mm</p> <p>Id. do Proprietário : 059606</p> <p>2 - PADRÃO DE REFERÊNCIA</p> <p>Nível diferencial</p> <p>Modelo / Código : N/C</p> <p>No. de Série : 7319</p> <p>Certificado No. : 15363/12- RBC - Mitutoyo</p> <p>Validade : 12/2013</p> <p>3 - PROCEDIMENTO DE MEDIDAÇÃO : PML - 0044 Versão 1/2.</p> <p>O desvio de planeza do desempenho foi determinado através da medição angular com a utilização de um Nível. O método consiste em obter com a ajuda do nível, as alturas dos pontos de referência definida no mapeamento.</p> <p>Data de calibração : 28 de Maio de 2013</p> <p>Data de emissão : 04 de Julho de 2013</p> <p style="text-align: right;">  Carlos Kazuo Suetake Gerente do Depto de Garantia da Qualidade </p> <p style="text-align: center;">pág.: 1 / 2</p> <p><small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avalia a competência do laboratório e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI). A reprodução deste Certificado só poderá ser total e dependerá da aprovação por escrito da Mitutoyo.</small></p> <p><small>Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.</small></p> <p><small>*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 *Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5958 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br</small></p>	

ANEXO III (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO DESEMPENO DE GRANITO



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

Certificado de Calibração No. : 06994/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

4- RESULTADO DA MEDIDA : Mapeamento em (mm)

0,8	0,4	-0,8	-2,4	-2,2	-2,3	-1,5	-0,8	0,0
-0,1	0,8			-3,4			0,8	0,1
-1,0		-0,8		-4,5		0,0		0,1
-2,0			-0,6	-2,7	0,3			-0,4
-2,5	-2,4	-1,9	-1,8	-0,4	-0,2	1,0	-0,1	-1,0
-2,7			1,4	-1,0	0,0			-0,7
-1,3		1,1		-2,4		-0,6		-0,5
-0,2	0,3			-3,4			-0,3	0,2
0,0	-0,6	0,0	-3,3	-3,6	-3,0	-2,4	-1,0	0,8

Erro de Planeza : 5,8 μm Lado : dois apoios

5 - INCERTEZA DE MEDIDA : $U = 2,9 \mu\text{m}$

A incerteza expandida de medida relatada é declarada como a incerteza padrão da medida multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,25$, para o qual uma distribuição com $V_{eff} = 11$ graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medida foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6- Nota : Temperatura ambiente : $(20,4 \pm 0,5)^\circ\text{C}$

pág.: 2 / 2

*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722

*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br