

KARINA ALVES FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DIMENSIONAL E
GEOMÉTRICA DE CILINDROS DE BLOCOS DE
COMPRESSORES HERMÉTICOS USINADOS PELO
PROCESSO DE BRUNIMENTO FLEXÍVEL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

KARINA ALVES FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA DE
CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS
USINADOS PELO PROCESSO DE BRUNIMENTO FLEXÍVEL**

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

2014

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

F363a
2014

Fernandes, Karina Alves, 1988-
Avaliação da qualidade dimensional e geométrica de cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelo processo de brunimento flexível / Karina Alves Fernandes. - 2014.
186 f. : il.

Orientador: Valdés Valdés Arencibia.
Coorientador: Luciano José Arantes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de .
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Compressores - Teses. 3. Medição - Teses. I. Valdés Arencibia, Valdés. II. Arantes, Luciano José. III. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de. IV. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer o apoio e a ajuda de todos os professores, colegas, amigos e familiares, que contribuíram para que este sonho de me tornar mestre se concretizasse, 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 Luciano da Rocha Magalhães e principalmente José Eduardo Leal e Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa, pela disposição e contribuição direta no trabalho desenvolvido.

Aos amigos, pelo apoio e companheirismo, especialmente Janaina Geisler e Laura Queiroz pela prontidão nos momentos de dificuldade.

À minha querida família, por estar presente em todos os momentos da minha vida, principalmente: ao meu querido pai Orozimbo que faleceu durante minha pós-graduação, por sempre acreditar em mim e pelo incentivo; à minha querida mãe Solange pelo amor incondicional e dedicação; à minha querida avó Dinah, que também veio a falecer, pelo carinho e pelas orações, à minhas primas Camilla e Amanda, por compartilharem os bons e maus momentos comigo.

Fernandes, K. A. **Avaliação da Qualidade Dimensional e Geométrica de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos Usinados pelo Processo de Brunimento Flexível.** 2014. 186f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade dimensional e geométrica de cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelo brunimento convencional e flexível. O brunimento convencional foi realizado pela EMBRACO, enquanto o brunimento flexível foi realizado na Universidade Federal de Uberlândia utilizando uma fresadora CNC e um brunidor flexível que é composto por uma haste metálica e cerdas de nylon com lóbulos abrasivos nas pontas. A avaliação da qualidade dimensional e geométrica foi efetuada por meio da medição do diâmetro do cilindro utilizando uma máquina de medir a três coordenadas e um micrômetro, dos desvios de cilindricidade e de circularidade por meio de uma máquina de medir desvios de forma e da rugosidade (Ra , Rq , Rt , Rsk , Rku , Rk , Rpk e Rvk), utilizando um rugosímetro eletromecânico e um interferômetro. Para cada mensurando foi estimada sua respectiva incerteza de medição, aplicando a metodologia proposta no GUM, exceto para a rugosidade, que foi utilizado o Método de Monte Carlo. Os resultados indicaram que o processo de brunimento flexível proporciona uma melhoria significativa dos valores dos parâmetros de rugosidade e do desvio de circularidade, enquanto que os valores de diâmetro permaneceram praticamente constantes. O brunimento flexível reduz a altura dos picos e elimina a presença isolada destes sem alterar a profundidade dos vales, proporcionando melhorias nas propriedades de amaciamento da superfície, retenção de lubrificante, na resistência mecânica e na capacidade de suportar cargas em operações de contato, atendendo as tolerâncias desejadas.

Palavras Chave: Compressores herméticos. Brunimento convencional e flexível. Qualidade dimensional e geométrica. Incerteza de medição.

Fernandes, K. A. **Evaluation of Geometrical and Dimensional Quality of Hermetic Compressors Block Cylinders Machined by Flexible Honing Process.** 2014. 186f.M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the geometrical and dimensional quality of block cylinders used in hermetic compressors machined by conventional and flexible honing. The conventional honing was done by EMBRACO, while the flexible honing was conducted at Federal University of Uberlândia using a CNC mill and a flexible honing which consists of a metal rod and nylon bristles with abrasive lobes at the ends. The evaluation of geometrical and dimensional quality was done by the measurement of: i) the cylinder diameter using a three coordinates measuring machine and a micrometer, ii) the circularity and cylindricity deviations using a shape deviation measuring machine and iii) the roughness (Ra , Rq , Rt , Rsk , Rku , Rk , Rpk e Rvk) using a electromechanical rugosimeter and a interferometer. For each measurand, it was estimated the related measurement uncertainty using the GUM methodology except for the roughness, where the Monte Carlo method was applied. The results showed that the flexible burnishing provides a significant improvement of the values of roughness parameters and the circularity deviation, while diameter values remained nearly constant. The flexible burnishing reduces the peak heights and eliminates the isolated occurrence of those without modify the valley depths, so providing improvements in proprieties such as surface softening, lubricant retention, mechanical strength and capacity to withstand loads in contact operations, meeting the desired tolerances.

Keywords: Hermetic compressors. Conventional and flexible honing. Dimensional and geometrical quality. Measurement uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Compressor recíproco alternativo hermético (a) e uma vista explodida, mostrando o pistão e o cilindro (b) (EMBRACO, 2012)	5
Figura 2.2 – Valores de rugosidade R_k , R_{pk} e R_{vk} para os diferentes processos de acabamento superficial em linha de produção (JOCSAK <i>et al</i> , 2005)	7
Figura 2.3 – (a) Desenho e (b) fotografia da primeira máquina de brunimento (FLORES, 2014).....	7
Figura 2.4 – Processo de formação de cavaco no brunimento (STOETERAU, 2006 <i>apud</i> FERREIRA; MAGALHÃES, 2009)	8
Figura 2.5 – (a) Brunimento de longo curso e (b) superfície cruzada, gerada pelo por este processo (AARON, 1995 <i>apud</i> FERREIRA; MAGALHÃES, 2009).....	10
Figura 2.6 – Brunimento de curso curto cilíndrico (AARON, 1995 <i>apud</i> FERREIRA; MAGALHÃES, 2009).....	11
Figura 2.7. Ferramenta brunidora para brunir componentes de compressores herméticos (BRUNITEC, 2014)	12
Figura 2.8 - (a) Brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BHME-150, (b) brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BHAMH-150, (c) brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BVA-7,5-600 (BRUNITEC, 2014), (d) brunidora horizontal automática multifuso do fabricante Nagel, modelo VS8 (NAGEL, 2014).....	14
Figura 2.9 - Brunimento de ferro fundido cinzento (fofo) utilizando (a) óleo para usinagem (honingoil) e (b) e emulsão (4%) (FLORES, 2009).....	16
Figura 2.10 – Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2008)	18
Figura 2.11 – Brunidores flexíveis do tipo esferas com diferentes diâmetros (VERTEC, 2008)	18

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).....	19
Figura 2.13 – (a) Representação gráfica dos desvios de circularidade e (b) de cilindridade (SOUZA <i>et al.</i> , 2011)	21
Figura 2.14 – Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994). Modificada	22
Figura 2.15 – Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).....	24
Figura 2.16 – Altura total do perfil (PIRATELLI-FILHO, 2011).....	27
Figura 2.17 – Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).....	29
Figura 2.18 – Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).....	29
Figura 2.19 – Curva de <i>Abbott-Firestone</i> (TAYLOR HOBSON, 2000).....	30
Figura 2.20 – Distribuição retangular (ISO TAG 4/WG 3, 2008).....	34
Figura 2.21 – Distribuição trapezoidal (ISO TAG 4/WG 3, 2008)	35
Figura 2.22 – Distribuição triangular (ISO TAG 4/WG 3, 2008)	35
Figura 2.23 – Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição usando a MMC	39
Figura 3.1 – Brunidora Vertical Automática da Gehring (GEHRING, 2014)	43
Figura 3.2 – (a) Máquina de medir a três coordenadas e (b) fixação do bloco na mesa de medição.....	44
Figura 3.3 – (a) Máquina universal de medir comprimentos (b) utilizada na medição do diâmetro do anel padrão.....	46
Figura 3.4 – (a) Medição do diâmetro interno do anel padrão e (b) medição do diâmetro do cilindro do bloco de um compressor hermético com micrômetro para medir internos.....	47
Figura 3.5 – (a) Máquina de medir desvios de forma e (b) fixação do bloco após cortado.....	48
Figura 3.6 – Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson apoiado em um suporte e (b) posicionado na mesa de desempenho da MMC	49
Figura 3.7 – Posições adotadas durante a medição da rugosidade do cilindro: (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3 e (d) Posição 4	50
Figura 3.8 - Interface gráfica do programa computacional Talysurf Gold 4.0	51
Figura 3.9 - (a) Interferômetro da Taylor Hobson, modelo TALYSURF CLI 2000, (b) peça apoiada sobre a mesa e fixada com massa de modelar.....	52

Figura 3.10 – Interface gráfica do programa TALYSURF CLI 2000	52
Figura 3.11 – Fresadora CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2014)	62
Figura 3.12 – Projeto para fabricação do dispositivo de fixação do bloco do compressor hermético em uma fresadora CNC	63
Figura 3.13 – Operação de fresamento em um tarugo cilíndrico utilizando uma máquina fresadora CNC, para fabricação do dispositivo de fixação.....	63
Figura 3.14 – Dispositivo fabricado para fixação do bloco de um compressor hermético em uma fresadora CNC	64
Figura 3.15 – Brunidor flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria 800 mesh	65
Figura 4.1 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com barra de erros associada ao desvio-padrão	71
Figura 4.2 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com barra de erros associada à incerteza de medição.....	73
Fig. 4.3 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente ao brunimento convencional e, na medição com MMC, referente ao brunimento convencional mais o flexível com barra de erros associada à incerteza expandida.....	73
Figura 4.4 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com barra de erros associada ao desvio-padrão.....	75
Figura 4.5 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro	76
Figura 4.6 – Gráficos dos desvios de cilindridade obtido para o cilindro do bloco 7 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.....	77
Figura 4.7 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida	78
Figura 4.8 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	80

Figura 4.9 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	80
Figura 4.10 – Gráficos do desvio de circularidade obtido para o cilindro do bloco 12 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.....	81
Figura 4.11 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 2 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	84
Figura 4.12 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 2 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com diferença percentual entre os processos.....	84
Figura 4.13 – Gráficos dos desvios de circularidade obtido para o cilindro do bloco 6 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.....	85
Figura 4.14 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	87
Figura 4.15 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível com diferença percentual entre os processos.....	88
Figura 4.16 – Gráficos dos desvios de circularidade obtido para o bloco 4 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.....	88
Figura 4.17 – Perfil efetivo obtido para o cilindro do bloco 12 na posição 1 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.....	90
Figura 4.18 – Perfil efetivo obtido na medição sem contato para (a) cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional e (b) cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível	91
Figura 4.19 – (a) Imagem e (b) topografia da superfície do cilindro usinado pelo brunimento convencional, referente ao bloco 15 e (c) imagem e (d) topografia da superfície do cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, referente ao bloco 9.....	93
Figura 4.20 – Curva de <i>Abbott-Firestone</i> obtida na medição com contato na posição 3, para o cilindro do bloco 12, usinado pelo (a) brunimento convencional e (b) pelo convencional mais o flexível.....	94
Figura 4.21 – Valores máximos de desvios-padrão (68,27%) associados à medição de <i>Ra</i> após o brunimento convencional (BC) e o convencional mais o flexível (BF).....	98

Figura 4.22 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível, com barra de erros associado ao desvio-padrão	98
Figura 4.23 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível, com barra de erros associado ao desvio-padrão	99
Figura 4.24 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível, com barra de erros associado ao desvio-padrão	99
Figura 4.25 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível, com barra de erros associado ao desvio-padrão	99
Figura 4.26 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	100
Figura 4.27 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	100
Figura 4.28 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	101
Figura 4.29 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	101
Figura 4.30 – Histograma da função densidade de probabilidade do parâmetro de rugosidade Ra referente ao cilindro do bloco 12, medido na posição 1, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível	102
Figura 4.31 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida	103
Figura 4.32 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida	104

Figura 4.33 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida	104
Figura 4.34 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida	104
Figura 4.35 – Valores médios de Rq , dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	108
Figura 4.36 – Valores médios de Rq , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	109
Figura 4.37 – Valores médios de Rt , dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e pelo convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	112
Figura 4.38 – Valores médios de Rt , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	112
Figura 4.39 – Valores médios de Rsk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.	115
Figura 4.40 – Valores médios de Rsk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	116
Figura 4.41 – Valores médios de Rku , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	118
Figura 4.42 – Valores médios de Rku , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	119
Figura 4.43 – Valores médios de Rk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	122
Figura 4.44 – Valores médios de Rk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro ..	122
Figura 4.45 – Valores médios de Rpk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	124
Figura 4.46 – Valores médios de Rpk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro	125
Figura 4.47 – Valores médios de Rvk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com barra de erros associado à incerteza expandida.....	126

- Figura 4.48 – Valores médios de Rvk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o convencional mais o flexível com diferença percentual de um processo para o outro 127
- Figura 4.49 – Parâmetros da família Rk obtidos a partir da curva de *Abbott-Firestone* para a leitura 1 (a) do cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimnto convencional e (b) do cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível. 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de brunimento para curso longo e curso curto (FRACARO, 2014)	11
Tabela 2.2 – Recomendação dos abrasivos em relação aos materiais a serem brunidos (VERTEC, 2008).....	18
Tabela 2.3 – Símbolos correspondentes aos desvios de forma (ABNT NBR 6409, 1997)	20
Tabela 2.4 – Comprimentos de amostragem para perfis não periódicos (ABNT NBR 4288, 2002).....	23
Tabela 2.5 – Parâmetros (ABNT NBR ISO 4287, 2002).....	25
Tabela 2.6 – Curvas e parâmetros relacionados (ABNT NBR ISO 4287, 2002).....	26
Tabela 3.1 – Parâmetros de corte para brunimento convencional (EMBRACO, 2014).....	43
Tabela 3.2 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição do diâmetro com MMC	54
Tabela 3.3 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à calibração do anel padrão, à calibração do micrômetro interno e a medição do diâmetro com micrômetro interno	55
Tabela 3.4 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição do desvio de cilindricidade e de circularidade.	56
Tabela 3.5 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição da rugosidade com rugosímetro e com interferômetro.....	59
Tabela 3.6 – Funções utilizadas para a simulação do MC (EXCEL, 2007).....	60
Tabela 3.7 – Parâmetros de corte para o brunimento flexível.....	62
Tabela 3.8 – Especificações da ferramenta brunidora flexível (VERTEC, 2008)	65

Tabela 4.1 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros dos blocos 7 e 13 usinados pelos brunimentos convencional.....	66
Tabela 4.2 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível.....	67
Tabela 4.3 - Avaliação da incerteza para o diâmetro do cilindro do bloco 1, medido com MMC, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.	68
Tabela 4.4 – Valores das indicações, média aritmética (\bar{x}) e desvio-padrão do diâmetro do anel padrão, medido com a MUC.....	69
Tabela 4.5 – Valores das indicações, média aritmética (\bar{x}) e desvio-padrão do diâmetro do anel padrão, medido com micrômetro para internos	70
Tabela 4.6 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.....	71
Tabela 4.7 - Avaliação da incerteza para o diâmetro do cilindro do bloco 1, usinado pelo brunimento convencional e medido com micrômetro interno, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade	72
Tabela 4.8 – Valores médios, desvios-padrão e incertezas expandidas dos desvios de cilindridade em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	75
Tabela 4.9 – Avaliação da incerteza para o desvio de cilindridade do cilindro 1 usinado pelo brunimento convencional, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) desvio-padrão; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.....	77
Tabela 4.10 – Valores obtidos para média, desvio-padrão, incerteza expandida e fator de abrangência do desvio de circularidade para o plano 1, em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	79
Tabela 4.11 - Avaliação da incerteza associado ao desvio de circularidade no plano 1 do cilindro 1, usinado pelo brunimento convencional, em que: (TI) tipo de avaliação da	

incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade	82
Tabela 4.12 – Valores médios, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 2, em cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.....	83
Tabela 4.13 – Valores médios, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 3, em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	86
Tabela 4.14 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível medidos na posição 1	95
Tabela 4.15 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível medidos na posição 2	95
Tabela 4.16 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível medidos na posição 3	96
Tabela 4.17 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível medidos na posição 4	96
Tabela 4.18 - Avaliação da incerteza para Ra na posição 1, do cilindro 12 usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.....	103
Tabela 4.19 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Ra para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	106
Tabela 4.20 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvios-padrão (s) e incertezas expandidas (U) do Rq em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível medidos na posição 1	107
Tabela 4.21 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Rq para o cilindro do bloco 15,	

usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	109
Tabela 4.22 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_t em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o flexível.....	110
Tabela 4.23 – Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do R_t para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	113
Tabela 4.24 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_{sk} em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e o flexível.....	114
Tabela 4.25 – Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do R_{sk} para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	117
Tabela 4.26 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_{ku} em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e flexível	118
Tabela 4.27 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do R_{ku} para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	120
Tabela 4.28 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_k em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	121
Tabela 4.29 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_{pk} em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	123
Tabela 4.30 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_{vk} em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível	126
Tabela 4.31 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) dos parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk} para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).....	128

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- a : Metade do comprimento da base de um retângulo ou de um triângulo
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ap : Profundidade de corte
- A_r : Raio da ponta do apalpador
- BC: Brunimento convencional
- BF: Brunimento convencional mais o flexível
- CA: Coeficiente de assimetria
- C_{Circ} : Desvio de circularidade
- C_{CY} : Desvio de cilindridade
- CS: Coeficiente de sensibilidade
- D : Deformação da peça durante a medição
- D_{MI} : Diâmetro do cilindro medido com o micrômetro interno
- D_{MMC} : Diâmetro do cilindro medido com a máquina de medir a três coordenadas
- DP: Tipo de distribuição de probabilidades
- E : Erro de apalpamento da máquina de medir a três coordenadas
- Embraco: *S/A Whirlpool* – Unidade Compressores
- f : Função matemática que engloba todas as variáveis do processo de medição
- FDP: Função densidade de probabilidade
- Fn : Normal
- Ft : Força tangencial
- GL: Grau de liberdade
- GUM: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
- IC_{AP} : Incerteza associada à calibração do anel padrão
- IC_I : Incerteza associada à calibração do interferômetro
- IC_{MI} : Incerteza associada à calibração do micrômetro interno

IC_{MMC} : Incerteza associada à calibração da máquina de medir a três coordenadas
 IC_{MMDf} : Incerteza associada à calibração da máquina de medir desvios de forma
 IC_{MUC} : Incerteza associada à calibração da máquina universal de medir comprimentos
 IC_{Rug} : Incerteza associada à calibração do rugosímetro
 IHM: Interface Homem Máquina
 INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
 ISO: *International Organization for Standardization*
 k : Fator de abrangência
 LMD: Laboratório de Metrologia Dimensional
 LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
 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
 MMC: Máquina de Medir a Três Coordenadas
 $Mr1$: Fração de contato mínimo
 $Mr2$: Fração de contato máximo
 MUC: Máquina Universal de Medir Comprimentos
 n : Número de elementos da amostra
 N : Número de variáveis de influência
 p : Probabilidade
 P : Valor médio do parâmetro avaliado
 $p(x_i)$: Função densidade de probabilidade
 PR_t : Parâmetro de rugosidade medido sem contato
 PR_{Rug} : Parâmetro de rugosidade medido com contato
 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
 Rc : Altura média dos elementos do perfil
 R_t : Resolução do interferômetro

R_k : Rugosidade do núcleo do perfil

R_{ku} : Fator de achatamento do perfil (*Kurtosis*)

R_{MI} : Resolução do micrômetro interno

R_{MMC} : Resolução da máquina de medir a três coordenadas

R_{MMDf} : Resolução da máquina de medir desvios de forma

R_{MUC} : Resolução da máquina universal de medir comprimentos

R_p : Altura máxima do pico do perfil

R_{pk} : Região de pico

R_q : Desvio médio quadrático do perfil

R_{Rug} : Resolução do rugosímetro

R_{sk} : Fator de assimetria do perfil (*skewness*)

R_{sm} : Largura média dos elementos do perfil

R_t : Altura total do perfil

R_v : Profundidade máxima do vale do perfil

R_{vk} : Região de vale

R_z : Altura máxima do perfil

$R_{\Delta q}$: Inclinação quadrática média do perfil avaliado

s : Desvio padrão experimental

$s(L_{AP})$: Variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do anel padrão

$s(L_I)$: Variabilidade dos valores indicados pelo interferômetro

$s(L_{MI})$: Variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do cilindro

$s(L_{MMC})$: Variabilidade dos valores indicados pela máquina de medir a três coordenadas

$s(L_{MMDf})$: Variabilidade dos valores indicados pela máquina de medir desvios de forma

$s(L_{MUC})$: Variabilidade dos valores indicados pela máquina universal de medir comprimentos

$s(L_{Rug})$: Variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro

TI: Tipo de avaliação da incerteza

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

uc : Incerteza padrão combinada

U : Incerteza expandida

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

$\nu_{efetivo}$: Graus de liberdade efetivo

VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia

\bar{x} : Média aritmética

x_i : Estimativa da variável X_i

\bar{x}_i : Média aritmética dos M valores atribuídos a x_i

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

β : Metade do comprimento da base menor de um trapézio

μ Média de uma distribuição normal

η : Ângulo da direção efetiva

ΔA_R : Correção associada ao raio da ponta do apalpador

ΔD : Correção associada à deformação do material durante a medição

ΔD_{EXC} : Correção associada ao desvio de excentricidade da mesa da máquina de medir desvios de forma

ΔE : Correção associada ao erro de apalpamento da máquina de medir a três coordenadas

ΔIC_{AP} : Correção associada à incerteza padrão da calibração do anel padrão

ΔIC_I : Correção associada à incerteza padrão da calibração do interferômetro

ΔIC_{MI} : Correção associada à incerteza padrão da calibração do micrômetro interno

ΔIC_{MMC} : Correção associada à incerteza padrão da calibração da máquina de medir a três coordenadas

ΔIC_{MMDf} : Correção associada à incerteza padrão da calibração da máquina de medir desvios de forma

ΔIC_{MUC} : Correção associada à incerteza padrão da calibração da máquina universal de medir comprimentos

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

ΔR_I : Correção associada à resolução do interferômetro

ΔR_{MI} : Correção associada à resolução do micrômetro interno;

ΔR_{MMC} : Correção associada à resolução da máquina de medir a três coordenadas

ΔR_{MMDf} : Correção associada à resolução da máquina de medir desvios de forma

ΔR_{MUC} : Correção associada à resolução da máquina universal de medir comprimentos

ΔR_{Rug} : Correção associada à resolução do rugosímetro

$\Delta s(L_{AP})$: Correção associada à variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do anel padrão

$\Delta s(L_I)$: Correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo interferômetro

$\Delta s(L_{MI})$: Correção associada à variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do cilindro

$\Delta s(L_{MMC})$: Correção associada à variabilidade dos valores indicados pela máquina de medir a três coordenadas

$\Delta s(L_{MMDf})$: Correção associada à variabilidade dos valores indicados pela máquina de medir desvios de forma

$\Delta s(L_{MUC})$: Correção associada à variabilidade dos valores indicados pela máquina universal de medir comprimentos

$\Delta s(L_{Rug})$: Correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo rugosímetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Compressor recíproco alternativo hermético	5
2.2. Brunimento	6
2.2.1. <i>Brunimento de curso longo e brunimento de curso curto</i>	9
2.2.2. <i>Ferramenta precidor</i>	12
2.2.3. <i>Máquinas de brunir</i>	13
2.2.4. <i>Fluidos para brunimento</i>	14
2.2.5. <i>Brunimento flexível</i>	16
2.2.5.1. <i>Ferramenta brunidora flexível tipo esferas</i>	17
2.3. Tolerâncias dimensionais e geométricas	19
2.3.1. <i>Tolerâncias dimensionais</i>	19
2.3.2. <i>Tolerâncias geométricas</i>	20
2.3.2.1. <i>Desvio de cilindricidade e de circularidade</i>	21
2.3.2.2. <i>Rugosidade</i>	21
2.4. Incerteza de medição	31
2.4.1. <i>Avaliando a incerteza-padrão</i>	32
2.4.2. <i>Avaliação Tipo A da incerteza-padrão</i>	33
2.4.3. <i>Avaliação Tipo B da incerteza-padrão</i>	33
2.4.4. <i>Determinando a incerteza- padrão combinada</i>	36
2.4.5. <i>Determinando a incerteza expandida</i>	37
2.5. Estimativa da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo (MC)	38
2.5.1. <i>Avaliação do modelo</i>	39
2.5.2. <i>Representação discreta da distribuição da função para a variável de saída</i>	40
2.5.3. <i>Estimativa da variável de saída e da incerteza padrão associada</i>	40
2.5.4. <i>Intervalo de abrangência para a variável de saída</i>	41

CAPÍTULO III – METODOLOGIA	42
3.1. Brunimento convencional	43
3.2. Avaliação dimensional do cilindro	44
3.2.1. Medição do diâmetro do cilindro com a MMC	44
3.2.2. Medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno	45
3.3. Avaliação geométrica do cilindro	47
3.3.1. Medição dos desvios de circularidade e de cilindridade do cilindro	47
3.3.2. Medição com contato da rugosidade do cilindro	49
3.3.3. Medição sem contato da rugosidade do cilindro	51
3.4. Avaliação da incerteza de Medição	53
3.4.1. Incerteza associada à medição do diâmetro do cilindro	53
3.4.1.1. Incerteza associada à medição do diâmetro com MMC	53
3.4.1.2. Incerteza associada à medição do diâmetro com micrômetro interno	54
3.4.2. Incerteza associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade	56
3.4.3. Incerteza associada à medição da rugosidade do cilindro	57
3.4.3.1. Identificação das variáveis de influência	57
3.4.3.2. Definição do modelo matemático	58
3.4.3.3. Determinação do número de iterações para aplicação do MC	60
3.4.3.4. Geração de números aleatórios	60
3.4.3.5. Obtenção dos valores do mensurando	61
3.4.3.6. 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	61
3.5. Brunimento flexível	61
3.5.1. Sistema de fixação e alinhamento do cilindro	63
3.5.2. Ferramenta de corte	64
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1. Medição do diâmetro do cilindro com MMC	66
4.2. Medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno	69
4.2.1. Calibração do anel padrão	69
4.2.2. Calibração do micrômetro	69
4.3. Desvio de cilindridade do cilindro	74
4.4. Desvio de circularidade do cilindro	78

4.4.1. Desvio de circularidade no plano 1 do cilindro	79
4.4.2. Desvio de circularidade no plano 2 do cilindro	82
4.4.3. Desvio de circularidade no plano 3 do cilindro	85
4.5. Rugosidade do cilindro	89
4.5.1. Perfis efetivos obtidos através das medições com e sem contato	89
4.5.2. Topografia do perfil de rugosidade	92
4.5.3. Curva de Abbott-Firestone	93
4.5.4. Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade do cilindro (R_a)	94
4.5.5. Avaliação do R_a na medição sem contato	105
4.5.6. Desvio aritmético quadrático do perfil de rugosidade (R_q)	106
4.5.7. Avaliação do R_q na medição sem contato	109
4.5.8. Altura total do perfil de rugosidade (R_t)	110
4.5.9. Avaliação do R_t na medição sem contato	113
4.5.10. Fator de assimetria do perfil de rugosidade (R_{sk})	114
4.5.11. Avaliação do R_{sk} na medição sem contato	117
4.5.12. Fator de achatamento do perfil de rugosidade (R_{ku})	117
4.5.13. Avaliação do R_{ku} na medição sem contato	120
4.5.14. Rugosidade do núcleo do perfil (R_k)	120
4.5.15. Região de pico (R_{pk})	123
4.5.16. Região de vale (R_{vk})	125
4.5.17. Avaliação dos parâmetros da família R_k na medição sem contato	128
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	131
CAPÍTULO VI – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	133
CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNDICES	i
APÊNDICE I - Certificado de Calibração do Anel Padrão	ii
APÊNDICE II - Certificado de Calibração do Micrômetro Interno	iv
ANEXOS	vi

ANEXO 1 - Certificado de Calibração da Máquina de Medir a Três Coordenadas	vii
ANEXO 2 - Certificado de Calibração do Termo-higrômetro	xi
ANEXO 3 - Certificado de Calibração da Máquina Universal de Medir Comprimentos ..	xiii
ANEXO 4 - Certificado de Calibração da Máquina de Medir Desvios de Forma	xviii
ANEXO 5 - Certificado de Calibração do Rugosímetro	xx
ANEXO 6 - Certificado de Calibração do Interferômetro	xxiii

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A maioria dos sistemas de refrigeração se baseia no princípio de compressão e expansão de fluido com mudança de fase. Dentro desses sistemas o compressor tem papel destacado, por ser o elemento ativo que força a circulação do fluido (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002). No entanto, para se obter melhor desempenho do compressor é importante que, mecanicamente, as peças com movimento relativo apresentem um adequado ajuste de geometrias, evitando vazamentos, desgastes e minimizando atritos, que conduzem a uma perda de eficiência (ROSA, 2012).

Neste sentido, o par tribológico formado pelo cilindro e o pistão presente nos compressores recíprocos alternativos merece destaque, uma vez que é responsável por comprimir o fluido refrigerante. Cabe ressaltar que falhas neste sistema podem comprometer o funcionamento do compressor, podendo até ocasionar travamento. O adequado funcionamento deste conjunto requer elevada exatidão dimensional e geométrica dos seus componentes, e quando não são alcançadas muitas vezes dificultam a montagem, além de provocar o aparecimento de esforços desgastantes (ROSA, 2012).

Um dos requisitos para o adequado funcionamento do par cilindro-pistão é a ausência de contato metal-metal. Entretanto, a presença de picos isolados no perfil de rugosidade, mesmo quando estes aparecem ao acaso, podem comprometer o atendimento desta exigência. Assim sendo, verificou-se a necessidade de efetuar uma operação de acabamento superficial nos cilindros de forma a eliminar os picos isolados presentes na superfície e arredondar o cume da maior quantidade de picos de forma a deslocar a linha média, do perfil de rugosidade, na direção destes.

Neste contexto, surgiu à proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal avaliar a qualidade dimensional e geométrica do cilindro de blocos de compressores herméticos submetidos ao processo de brunimento utilizando-se uma fresadora CNC e o brunidor flexível. Pretende-se, ainda:

- Efetuar o processo de brunimento no cilindro utilizando-se a fresadora CNC, definindo-se o diâmetro da ferramenta e os parâmetros de corte, tais como, rotação e o número de passadas (golpes) da ferramenta;
- Investigar o efeito da operação de brunimento no acabamento superficial, por meio da verificação da variação dimensional do cilindro, dos desvios de cilindridade e de circularidade e da rugosidade;
- Avaliar a incerteza de medição dos mensurandos através da aplicação da metodologia proposta no ISO TAG 4WG 3 (2008) e do método de Monte Carlo, em função da complexidade do mensurando avaliado.

O trabalho é apresentado em 7 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, brunimento, tolerâncias dimensionais e geométricas, especificamente desvios de forma e rugosidade e incerteza de medição.

Capítulo III: Descrição da metodologia utilizada para atingir os objetivos inicialmente propostos, que são: usinagem do cilindro com a operação de brunimento convencional, realizado pela EMBRACO; definição da estratégia de medição do diâmetro, dos desvios de cilindridade e de circularidade e da rugosidade; calibração do anel padrão e do micrômetro utilizado na medição do diâmetro; determinação dos modelos matemáticos para avaliação da incerteza de medição e identificação das variáveis de influência, do tipo de distribuição e do número de graus de liberdade; e por último, o procedimento necessário para efetuar o brunimento em uma fresadora CNC com brunidor flexível.

Capítulo IV: Apresentação dos resultados obtidos em cada etapa descrita no capítulo III, seguida da análise e discussão.

Capítulo V: Conclusões e considerações finais sobre a investigação do presente trabalho.

Capítulo VI: Sugestões e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo VII: Referências bibliográficas utilizadas para construção e fundamentação teórica do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compressor recíproco alternativo hermético

Os compressores são mecanismos muito importantes no circuito de refrigeração, tendo como função a circulação do fluido refrigerante dentro do circuito. Eles podem ser apresentados em diferentes configurações: recíprocos alternativos, rotativos de parafuso e de palhetas e centrífugos. Entre estes, os mais comuns em instalações de capacidade até 1.000 kW são os recíprocos alternativos e os rotativos de parafuso. Os compressores podem ainda serem construídos em distintas concepções, destacando-se entre elas os tipos aberto, semi-hermético e hermético (STOECKER; SAIZ JABARDO, 2002).

Os compressores recíprocos alternativos comprimem o fluido refrigerante através dos movimentos alternados de pistões e bielas que trabalham reciprocamente. 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 (Fig. 2.1a), 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 compressora 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).

O princípio de funcionamento do compressor recíproco alternativo hermético é descrito a seguir. A energia elétrica fornecida ao motor do compressor faz com que este entre em funcionamento, gerando movimento circular sobre seu eixo. O movimento rotativo do eixo

excêntrico é transformado, através do conjunto biela-manivela, em movimento linear do pistão. Com o auxílio das válvulas de sucção e descarga, o pistão, nos seus movimentos descendentes e ascendentes, provoca a transferência de fluido do lado de baixa pressão para o de alta pressão (EMBRACO, 1990).

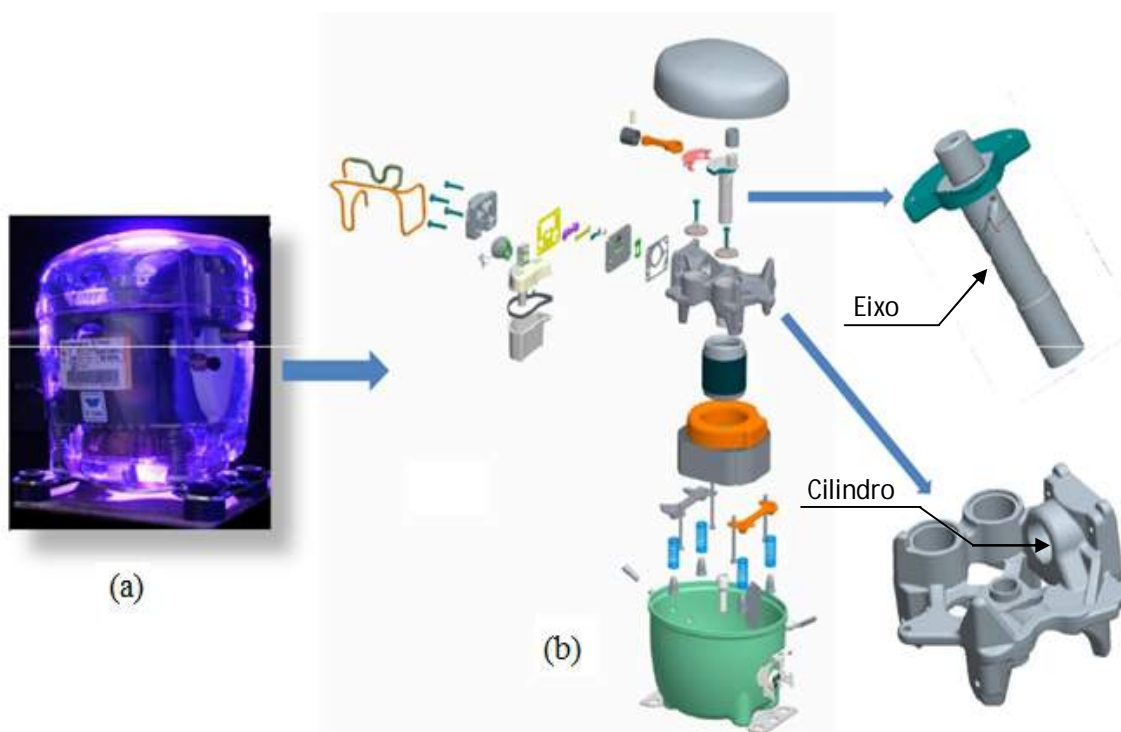


Figura 2.1 – Compressor recíproco alternativo hermético (a) e uma vista explodida, mostrando o eixo e o cilindro (b) (EMBRACO, 2012).

O movimento do pistão possui dois limites físicos, o ponto morto superior e o ponto morto inferior. O período em que o pistão está no sentido ponto morto superior para ponto morto inferior é chamado de etapa de expansão, uma vez que o fluido no interior do cilindro sofre um processo de expansão em função do aumento de volume. Quando a pressão no interior do cilindro torna-se menor que na região de sucção, a válvula de sucção se abre permitindo a entrada de refrigerante. Durante esta etapa a pressão interna é menor do que a pressão de descarga, dessa forma, a válvula de descarga permanece fechada, impedindo a saída do refrigerante do cilindro. Essas válvulas são comandadas unicamente pela diferença de pressão. Quando o ponto morto inferior é atingido, o pistão movimenta-se no outro sentido (ponto morto inferior para ponto morto superior), sendo que o fluido vai sendo comprimido e

a pressão interna do cilindro aumentando, constituindo a etapa de compressão. Nesta etapa, pelo fato da pressão interna ser maior que a de sucção, a válvula de sucção permanece fechada e, quando a pressão interna atinge um ponto em que é maior que a pressão de descarga, a válvula de descarga se abre, permitindo que o fluido seja direcionado, sob alta pressão, para o resto do sistema. Quando o pistão atingir o ponto morto superior, um novo ciclo é iniciado (KOERICH, 2004 *apud* HENKLEIN, 2006).

A Figura 2.1b apresenta uma vista explodida das diversas peças que compõem um modelo específico deste tipo de compressor. Nela são indicados o eixo e o cilindro, sendo este último objeto de estudo neste trabalho.

As peças com movimento relativo, destacando-se o par cilindro-pistão, requerem elevada exatidão dimensional e geométrica, pois quando não são alcançadas podem resultar em dificuldades de montagem, além de contribuir para o aparecimento de esforços desgastantes, problemas de ruído e riscos de trancamento do pistão (ROSA, 2012).

A fim de produzir um acabamento superficial capaz de minimizar o atrito gerado pelo contato metal-metal entre o cilindro e o pistão, atendendo aos requisitos citados acima, foi proposto uma operação de usinagem, denominada brunimento flexível, descrita a seguir.

2.2. Brunimento

A crescente necessidade de aumentar a durabilidade de componentes mecânicos trabalhando como pares tribológicos, aliada ao menor consumo de óleo, seja em motores de combustão interna, seja em compressores herméticos para refrigeração, tem demandado o desenvolvimento de várias técnicas de acabamento e superacabamento de superfícies.

A Figura 2.2 apresenta uma relação entre os diferentes tipos de processos de acabamento de superfícies com os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_k , R_{pk} e R_{vk} (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 *Slide*, têm-se menores valores de R_k e vales relativamente profundos, quando comparados ao processo convencional (JOCSAK *et al*, 2005).

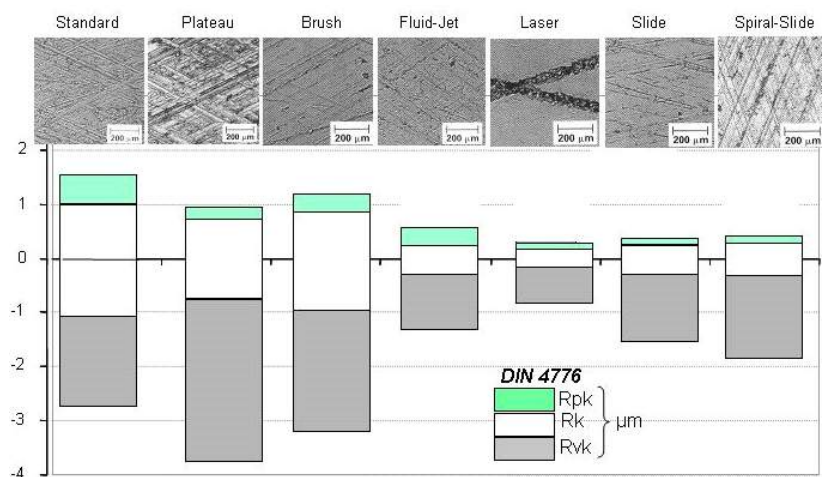
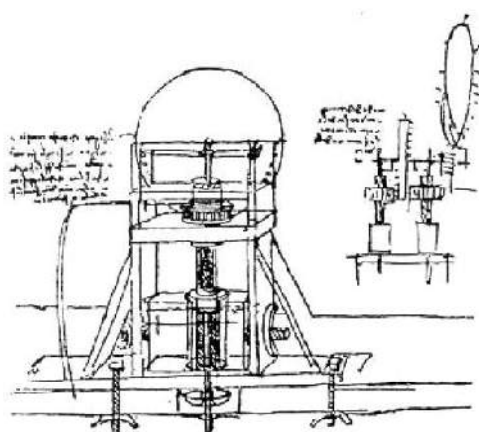


Figura 2.2 – Valores de rugosidade Rk , Rpk e Rvk para os diferentes processos de acabamento superficial em linha de produção (JOCSAK *et al*, 2005).

O brunimento é um processo de usinagem utilizado para gerar acabamentos superficiais, cuja origem se deu por volta do ano de 1500 quando Leonardo da Vinci esboçou uma máquina para usinagem fina de tubos de madeira. No entanto, somente durante as décadas iniciais do século XX foi que surgiu a primeira máquina de brunimento denominada brunidor ou brunidora, Fig.2.3 (FLORES, 2014).



(a)



(b)

Figura 2.3 – (a) Desenho e (b) fotografia da primeira máquina de brunimento (FLORES, 2014).

Este processo é caracterizado pela remoção do material, no qual os grãos abrasivos encontram-se em constante contato com a superfície da peça. Tem-se assim, uma grande área de contato entre o abrasivo e a peça, além de pressões e velocidades de corte baixas (BYRNES; FISCHER, 1992; NOAKER, 1991), quando comparado aos outros processos que utilizam abrasivos, como a retificação.

Durante a usinagem no processo de brunimento, as cristas 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. 2.4. No início da penetração do grão abrasivo apenas uma pequena porção deste penetra na superfície da peça, não havendo formação de cavaco. O material escoam sob e para os lados dos grãos abrasivos, formando rebarbas. A penetração do grão abrasivo na peça ocorre até que a mesma seja suficiente para ocorrer o cisalhamento do material e a formação do cavaco (KÖNIG, 1989; BRÜLÉ, 1992 *apud* ANDRETA, 2001).

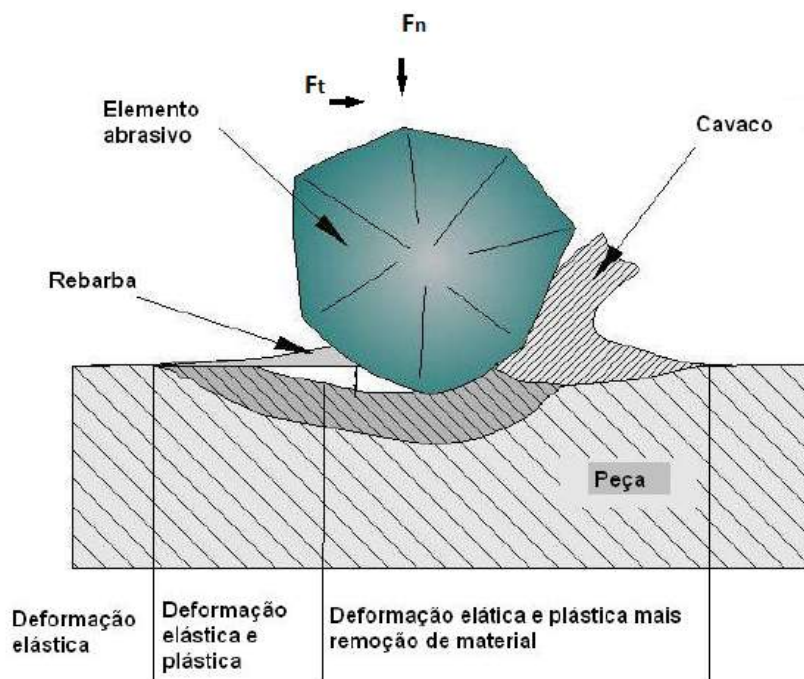


Figura 2.4 – Processo de formação de cavaco no brunimento (STOETERAU, 2006 *apud* FERREIRA; MAGALHÃES, 2009).

A profundidade de corte é de 5 a 10% do diâmetro do abrasivo (BARTON; HAASIS, 1993). Esta profundidade de corte é obtida em função da força radial e das características da

ferramenta. A força de usinagem que atua sobre a aresta de corte do grão abrasivo durante a usinagem pode ser subdividida em duas componentes, força tangencial F_t , no sentido de corte e F_n , normal ao sentido do corte, Fig. 2.4 (KÖING, 1989; BRÜLE, 1992 *apud* ANDRETA, 2001). As cristas dos grãos abrasivos adjacentes quebram as partículas do material deformado, que são retiradas pelo fluido de corte (BARTON; HAASIS, 1993).

O processo de brunimento permite a obtenção de peças com boa exatidão dimensional e geométrica, sendo uma de suas características a formação de sulcos onde se retém óleo, diminuindo o atrito e melhorando o deslizamento entre as superfícies das peças (CARBORUNDUM, 2005).

Balasubramanian *et al.*, 1987 *apud* Andretta (2001) afirmam que este processo permite:

- Remoção rápida e econômica de partículas, com aquecimento mínimo e distorção mínima;
- Geração de superfícies circunferenciais e de corte retilíneo, corrigindo desvios geométricos anteriores à operação;
- Obtenção do acabamento desejado da superfície, com boa qualidade dimensional.

A qualidade das peças brunidas pode ser afetada por dois grupos de fatores (KÖING, 1989 *apud* ANDRETTA, 2001): no primeiro grupo estão os fatores relacionados ao sistema de usinagem, que compreende as grandezas fixas, ou seja, os desvios dimensionais e geométricos relativos à fabricação e à montagem dos componentes da máquina, a peça, a ferramenta e o fluido de corte; enquanto no segundo grupo estão os fatores relacionados aos parâmetros de usinagem, que compreendem as grandezas variáveis, ou seja, a cinemática do processo, com os movimentos de corte e avanço, o curso e o tempo de espera. Incluem-se, também, como parâmetros de usinagem a pressão de contato do abrasivo na superfície da peça, a pressão e a vazão do fluido de corte e o estado de afiação dos grãos abrasivos da pedra.

2.2.1. Brunimento de curso longo e brunimento de curso curto

Conforme citado no trabalho de Visque (1998), a norma DIN 8589- parte 14 (1982) apresenta vários processos de brunimento, descritos abaixo:

- Brunimento plano: obtenção de superfícies planas;
- Brunimento circular: obtenção de superfícies circulares;

- Brunimento em parafuso: obtenção de superfícies helicoidais (por exemplo, roscas);
- Brunimento laminar: obtenção de superfícies que se originam de perfil proveniente de um processo de laminação;
- Brunimento de perfis: o perfil da ferramenta é reproduzido (estampado) em cima da peça;
- Brunimento de forma: outra forma de brunimento que não seja as anteriores.

Segundo esta norma, a diferença entre brunimento e superacabamento está no tamanho do curso do movimento de avanço da ferramenta, sendo denominado curso longo para brunimento e curso curto para superacabamento.

No brunimento de curso longo (Fig. 2.5a) o movimento de corte consiste de um movimento de rotação e um movimento de translação longo. Este processo pode corrigir desvios macrogeométricos advindos de processos anteriores. Aplicações típicas são encontradas em camisas de pistões utilizadas em motores de combustão interna, elementos hidráulicos, componentes de máquinas-ferramenta entre outros, principalmente para usinagens internas (VISQUE, 1998).

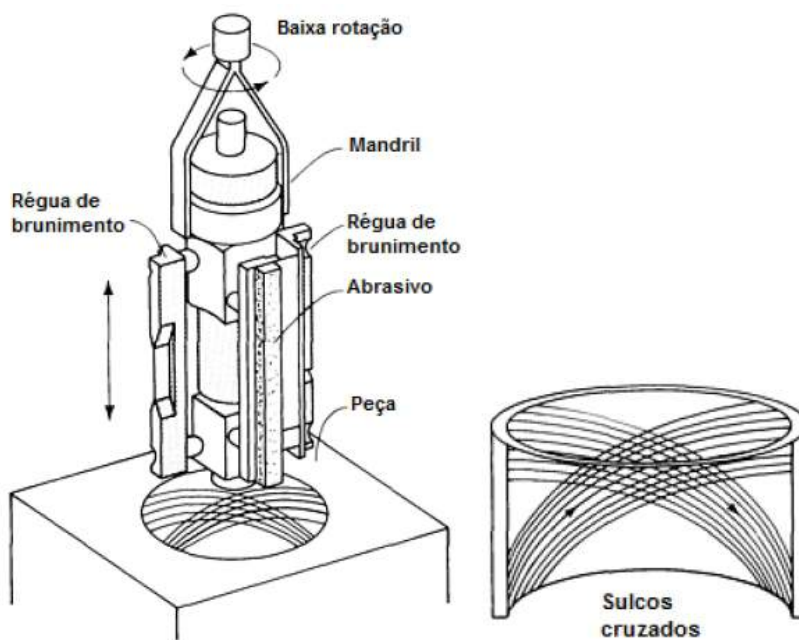


Figura 2.5 – (a) Brunimento de longo curso e (b) superfície cruzada, gerada por este processo (AARON, 1995 *apud* FERREIRA; MAGALHÃES, 2009).

No processo de brunimento o movimento de avanço é executado simultaneamente ao movimento de corte, produzindo na peça, uma superfície cruzada (Fig.2.5b). Esta superfície cruzada é necessária para fornecer meios de retenção do lubrificante na superfície operacional dos pares em movimento relativo (FENG, WANG e YU, 2002). O ângulo da direção efetiva η caracteriza esta superfície. A expansão radial é responsável pela profundidade de corte ap .

No brunimento de curso curto ou superacabamento, ou ainda microbrunimento (Fig. 2.6), o processo é efetuado com movimento de reciprocção (oscilação) muito rápido, variando a frequência de acordo com o sistema aplicado para a realização da operação e com o comprimento do curso, variando entre 300 e 2500 ciclos/min (KÖING, 1980 *apud* VISQUE, 1998).

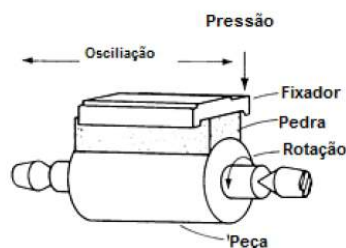


Figura 2.6 – Brunimento de curso curto cilíndrico (AARON, 1995 *apud* FERREIRA; MAGALHÃES, 2009).

O brunimento de curso curto é empregado principalmente em usinagens externas, por exemplo, em componentes de máquinas gráficas e bicos injetores de combustível, proporcionando uma superfície quase espelhada (VISQUE, 1998).

Na Tabela 2.1 são mostrados os tipos de brunimento para curso curto e curso longo.

Tabela 2.1 – Tipos de brunimento para curso longo e curso curto (FRACARO, 2014).

Brunimento de curso curto	Brunimento entre pontas
	Brunimento <i>centerless</i> de passagem
	Brunimento de mergulho
	Brunimento de perfis
Brunimento de curso longo	Brunimento de superfícies planas
	Brunimento de passe único
	Brunimento convencional

Ainda, os brunidores podem ser fabricados em abrasivos convencionais e superabrasivos. Segundo Carborundum (2005), em abrasivos convencionais, tem-se:

- Óxido de alumínio: Aplicação em aços e tubos hidráulicos;
- Carboneto de silício: Aplicação ferro fundido, materiais não ferrosos, camisas e blocos de motores;
- Tipo de liga: Os brunidores com abrasivos convencionais normalmente são fabricados com liga vitrificada.

E em superabrasivos, tem-se:

- CBN: Aplicação em aço temperado e tubos hidráulicos;
- Diamante: Aplicação em aços, ferro fundido, metal duro e cerâmica.

Os processos de brunimento de suma importância no presente trabalho são respectivamente, o brunimento convencional e o brunimento flexível.

2.2.2. Ferramenta precidor

A ferramenta denominada como brunidor precidor (Fig. 2.7) possibilita atingir-se erros de forma e geométricos de até 0,001 mm. O projeto do brunidor precidor 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, 2009).

O processo de corte completo é realizado em um único curso (em casos especiais mais cursos podem ser utilizados). A ferramenta é ajustável conforme o diâmetro de saída desejado e também pode ser empregada a compensação automática para desgaste por abrasão. Pode ser combinada com uma operação de pré-brunimento convencional ou com um processo de brunimento precidor multi-estágio em condições de alta remoção de material (NAGEL, 2012).



Figura 2.7. Ferramenta brunidora para brunir componentes de compressores herméticos (BRUNITEC, 2014).

2.2.3. Máquinas de brunir

Embora o brunimento seja uma operação de usinagem que englobe complexidades, o mesmo pode ser executado com auxílio de uma máquina ou manualmente. O brunimento manual refere-se à operação de translação onde a peça pode ser fixada em uma bancada em que a mesma flutue. O cabeçote brunidor é montado em furadoras ou prensas verticais que deslocam manualmente. Já as máquinas podem ser classificadas como: brunidoras horizontais manuais, brunidoras verticais automáticas, brunidoras horizontais automáticas e brunidoras horizontais automáticas multifusos, exemplificadas abaixo. Esta última é utilizada industrialmente nas operações de brunimento de blocos de compressores herméticos.

A Figura 2.8 mostra alguns exemplos de máquinas para brunir e suas especificações são descritas a seguir:

Figura 2.8a: Brunidora horizontal manual com capacidade de brunir furos de 4 mm a 80 mm de diâmetro e profundidade de 150 mm, com velocidade radial variável de 500 rpm a 3.200 rpm. Expansão mecânica manual da ferramenta de brunir acionada por pedal, visualização de remoção do material através de relógio comparador e luz sinalizadora quando alcança a medida pré-determinada e sistema de refrigeração por decantação (capacidade 45 litros).

Figura 2.8b: Brunidora horizontal manual com capacidade de brunir furos de 4 mm a 80 mm de diâmetro e profundidade de 150 mm com velocidade radial variável de 500 rpm a 3.200 rpm (controlada por inversor de frequência através de potenciômetro, visualizada através de tacômetro digital). Expansão hidráulica da ferramenta de brunir e sistema de medição pré-determinado (quando a peça chega à medida pré-determinada, a máquina desliga automaticamente).

Figura 2.8c: Brunidora horizontal manual com capacidade de brunir furos de 50 mm a 200 mm de diâmetro e profundidade de 600 mm com velocidade radial variável de 45 rpm a 160 rpm (controlada por inversor de frequência através de potenciômetro, visualizada através da interface homem máquina, IHM). Velocidade axial variável por comando eletro-hidráulico, com brunimento de curso curto em cima e em baixo para correção de conicidade. Expansão hidráulica da ferramenta de brunir, sistema de medição pneumático em processo e controle automático do tempo de brunimento.

Figura 2.8d: Brunidora horizontal automática multifuso com capacidade de brunir furos de 10 mm a 120 mm de diâmetro e profundidade de 700 mm. O funcionamento do equipamento é baseado na integração de linhas transfer, habilidade de automação e integração

com tecnologia de medição (*in-process* e *post-process*). É utilizado pela indústria para brunir cilindros e mancais de compressores herméticos.



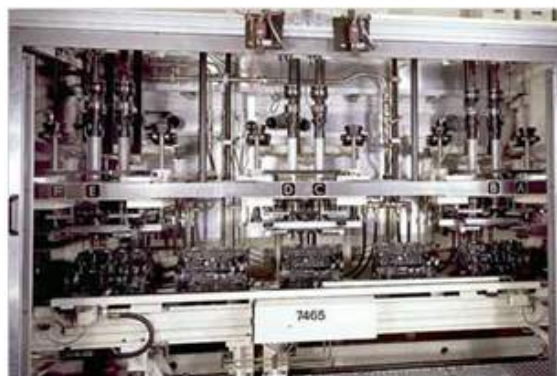
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.8 - (a) Brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BHME-150, (b) brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BHAMH-150, (c) brunidora horizontal manual do fabricante Brunitec, modelo BVA-7,5-600 (BRUNITEC, 2014), (d) brunidora horizontal automática multifuso do fabricante Nagel, modelo VS8 (NAGEL, 2014).

2.2.4. Fluidos para brunimento

O uso de um fluido durante o brunimento é de suma importância, pois é responsável pela limpeza, controle da temperatura e lubrificação da região de contato entre a ferramenta e a superfície a ser usinada.

A limpeza consiste na remoção do cavaco garantindo a higiene de todo o mecanismo. Além disso, ela desempenha um importante papel de desobstrução dos poros das pedras de brunir, recebendo assim grandes quantidades de fluido independente do diâmetro a ser brunido (entre 10 e 150l/min).

O processo de brunimento não é caracterizado por um aumento de temperatura durante a usinagem. No entanto vale ressaltar que o fluido também exerce a função de estabilizar a temperatura, controlando-a e evitando a ocorrência de erros dimensionais.

A lubrificação gera uma diminuição do coeficiente de atrito melhorando a macro e microestrutura e o rendimento do processo. Porém é menos eficaz no processo de brunimento do que em outras operações de usinagem, pois nenhum fluido exibe todas as propriedades necessárias ao cumprimento das funções acima descritas. Dessa forma, dois ou mais líquidos precisam ser misturados (AARON, 1995).

O acabamento superficial obtido depende do tipo e qualidade do fluido, assim como de seus aditivos. Os fluidos de brunimento podem ser divididos em miscíveis em água: as soluções e emulsões; ou não miscíveis em água: os óleos (FLORES, 2014).

Há certa divergência na literatura no que concerne a escolha do fluido de corte para o brunimento, pois não existe um fluido padrão. A solução é testar as opções mais comuns e identificar os melhores resultados. As indicações abaixo foram retiradas da literatura e servem como referência:

- Soluções à base de água são raramente utilizadas em virtude da baixa capacidade de lubrificação, da viscosidade insuficiente para evitar trepidações e por causar oxidação (AARON, 1995);
- Óleos minerais são amplamente utilizados no brunimento e possuem características um pouco melhores, como por exemplo, de viscosidade, comparado ao querosene. Pode-se também combinar óleo mineral (mineral seaoil) com querosene (AARON, 1995).

Conforme indicado pela companhia Chris-Marine (2014), especializada em brunimento de reparo de camisas de cilindro, não se deve usar óleo de usinagem (*honingoil*). No entanto, contrariando Aaron (1995), o mesmo recomenda misturar sabão de limpeza líquido (cerca de 10%) e óleo contra corrosão (3% a 5%) em água fresca. Como alternativa, pode-se usar querosene, desengraxante ou óleo Diesel.

Fabricantes de camisas de cilindro de motores diesel também divergem no que se refere à escolha do fluido para o brunimento. O fabricante *Rolls-Royce* indica a utilização de um

óleo de brunimento consistindo de uma mistura de óleo diesel e óleo lubrificante. Além disso, recomenda-se nunca usar petróleo, óleo diesel ou afim.

A Figura 2.9 mostra o resultado de um ensaio feito por Flores (2009), onde superfícies brunidas com diferentes fluidos foram comparadas. Nesse caso, a utilização de emulsões levou a uma qualidade superficial irregular perante a obtida usando-se óleos.

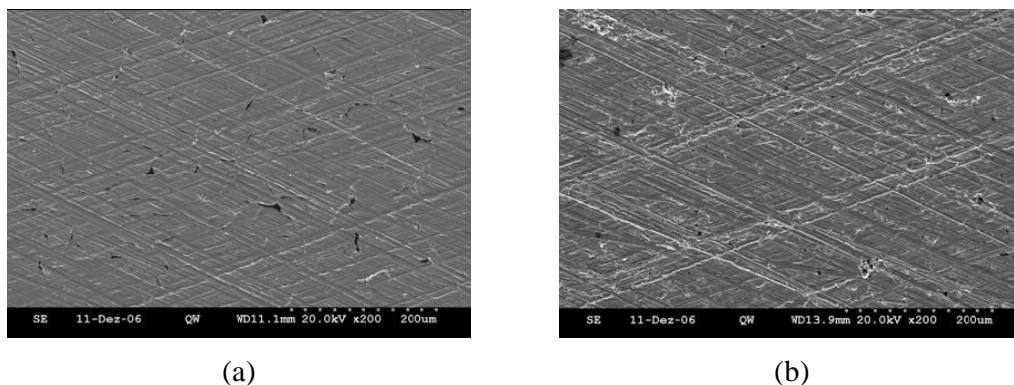


Figura 2.9 - Brunimento de ferro fundido cinzento (fofo) utilizando (a) óleo para usinagem (*honingoil*) e (b) emulsão (4%) (FLORES, 2009).

2.2.5. Brunimento flexível

O brunimento flexível é um método utilizado após o brunimento convencional que atua por intermédio de partículas abrasivas e elásticas de maneira a não alterar as características geométricas, tais como, cilindridade, concentricidade, coaxilidade e dimensões da peça (MILLER, 1993). Este método de brunimento está sendo cada vez mais utilizado como operação adicional, com o objetivo de arredondar os picos da superfície (BARTON; HAASIS, 1993).

Pode-se classificar o brunimento flexível em dois tipos:

- 1) Brunimento flexível tipo esferas: Este brunidor 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 (MILLHER, 1993; CHIH; STANGO, 1997). 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.

2) Brunimento flexível tipo escovas ou cerdas: Pode-se classificar este brunimento em outros dois tipos (VISQUE, 1998):

- a) O primeiro consiste de uma vareta giratória, muito parecida com escovas de limpar garrafas, que possui cerdas monofilamentosas de nylon impregnadas de abrasivos, onde o processo de corte consiste no chicoteamento da superfície da peça, pelos monofilamentos de nylon.
- b) O segundo 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.

Segundo Barton e Haasis (1993), a operação utilizando escovas produz os seguintes efeitos nas peças:

- A superfície fica 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;
- A rugosidade da superfície decresce de 2 μ m a 3 μ m em R_z (altura máxima do perfil de rugosidade);
- Em peças de ferro fundido a quantidade de flocos de grafite expostos é aumentada.

2.2.5.1. Ferramenta brunidora flexível tipo esferas

A ferramenta brunidora flexível 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 impossível de ser obtido por qualquer outro método de abrasão em baixa temperatura e pressão (VERTEC, 2008). Esta ferramenta é ideal para brunir, rebarbar, limpar, polir, desespelhar, remover óxido de ferro e dar acabamento em cilindros e tubos de qualquer material.

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. 2.10). De forma geral, o processo de brunimento pode ser automatizado ou manual, utilizando-se uma simples furadeira, onde o operador não precisa de qualificação especial.

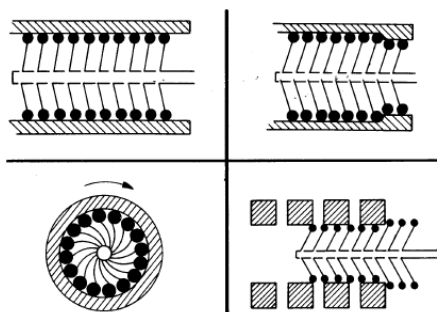


Figura 2.10 – Exemplos de aplicação de brunidores flexíveis (VERTEC, 2008).

Os fabricantes disponibilizam uma grande variedade de ferramentas, cujos diâmetros variam na faixa de 4 mm a 76 mm (Fig. 2.11), fabricadas utilizando diferentes materiais abrasivos (Tab. 2.2) e diferentes granulações, que variam de 20 *mesh* a 800 *mesh* (VERTEC, 2008).



Figura 2.11 – Brunidores flexíveis do tipo esferas com diferentes diâmetros (VERTEC, 2008).

Tabela 2.2– Recomendação dos abrasivos em relação aos materiais a serem brunidos (VERTEC, 2008).

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.

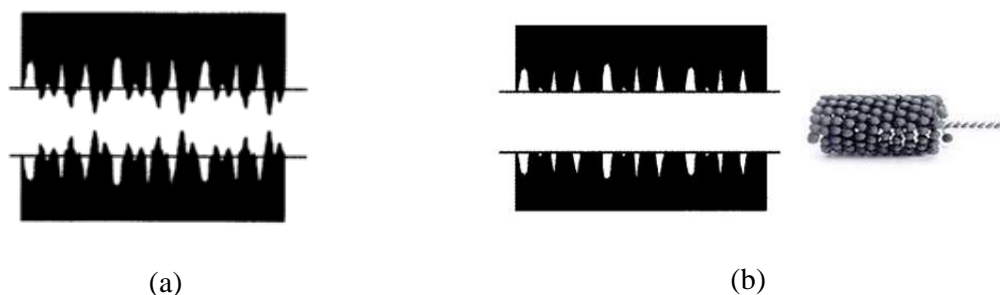


Figura 2.12 –(a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (VERTEC, 2008).

2.3. Tolerâncias dimensionais e geométricas

Toda operação realizada através dos processos de fabricação mecânica tem como objetivo principal produzir componentes intercambiáveis com o máximo de funcionalidade a custo conveniente. Isto significa que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto a dimensões, forma e acabamento superficial. Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos introduzidos nas últimas décadas esse objetivo é impossível de ser atingido.

A impossibilidade de se obter superfícies perfeitas dimensional e geometricamente criou a necessidade de quantificar e indicar, nas peças, as tolerâncias geométricas e, conseqüentemente, desenvolver meios para verificá-las.

2.3.1. Tolerâncias dimensionais






As tolerâncias dimensionais são abordadas pela ABNT NBR 6158 (1995) “Sistema de tolerâncias e ajustes” e são de suma importância para garantir a montagem, o bom funcionamento das peças e a intercambialidade. Entretanto, a indicação e verificação destas tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para atender essas demandas, surgindo à necessidade de indicar, também, tolerâncias geométricas.

2.3.2. Tolerâncias geométricas

As tolerâncias geométricas se dividem em dois grupos, a saber, tolerâncias macrogeométricas e microgeométricas.

As tolerâncias macrogeométricas são abordadas pela ABNT NBR 6409 (1997) “Tolerâncias Geométricas – Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento – Generalidades, Símbolos, Definições e Indicações em Desenho”. Dentre elas estão as tolerâncias de forma (Tab. 2.3), cuja aplicação assume grande importância em projetos mecânicos nos quais é requerida elevada exatidão. Elas são indispensáveis nas seguintes condições: em peças para as quais a exatidão de forma requerida não seja garantida com os meios normais de fabricação; em peças onde deve haver coincidência bastante aproximada entre as superfícies e em peças onde seja necessário, além do controle dimensional, o controle de forma para possibilitar montagens sem interferência (ABNT NBR 6409, 1997).

Tabela 2.3– Símbolos correspondentes aos desvios de forma (ABNT NBR 6409, 1997).

Forma	Símbolo
Retitude	—
Planeza	
Circularidade	
Cilindricidade	
Perfil de linha qualquer	
Perfil de superfície qualquer	

Neste trabalho, em particular será verificado o desvio de cilindridade e de circularidade do cilindro do compressor.

As tolerâncias microgeométricas são abordadas pela ABNT NBR 4287 (2002) e ABNT NBR 4288 (2008) 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 (NETO, 2012).

2.3.2.1. Desvio de cilindridade e de circularidade

O desvio de circularidade, graficamente, equivale à distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça. Para que a distância entre os círculos seja mínima, são considerados o maior círculo inscrito à seção transversal da peça e o menor círculo circunscrito, Fig.2.13a (ABNT NBR 6409, 1997).

Em alguns projetos a aplicação de tolerâncias de circularidade não é suficiente para garantir o bom funcionamento das peças. Nestes casos, se faz necessário o uso de tolerâncias de cilindridade para limitar os valores máximos deste desvio.

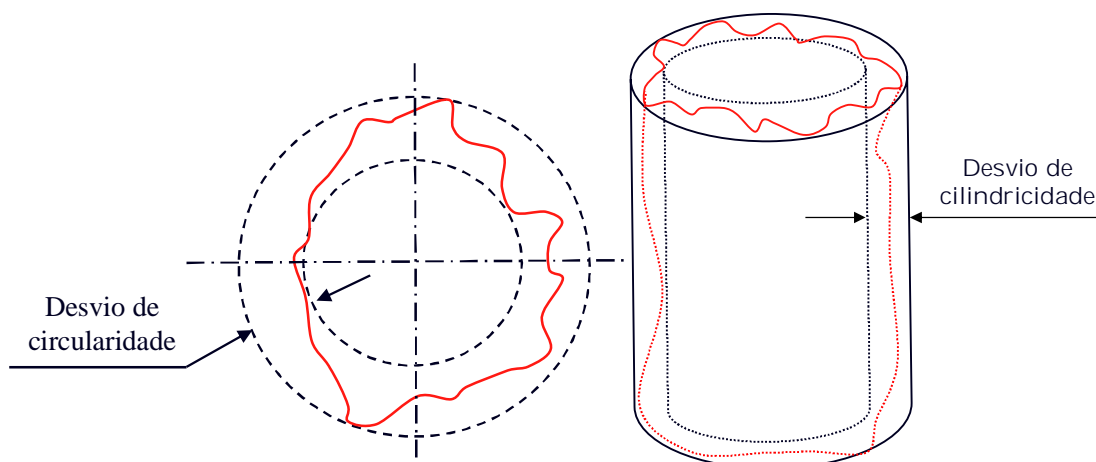


Figura 2.13 – (a) Representação gráfica dos desvios de circularidade e (b) de cilindridade (SOUZA *et al.*, 2011).

O desvio de cilindridade é definido como a diferença radial entre dois cilindros coaxiais entre os quais deve estar localizada a superfície real da peça, Fig. 2.13b (ABNT NBR 6409, 1997). Essa diferença deve ser no máximo igual à tolerância de cilindridade especificada.

2.3.2.2. Rugosidade

Agostinho; Rodrigues; Lirani (1977) definem a rugosidade como a soma das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem. Diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens são diferenças que se repetem, regular ou irregularmente, cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade.

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).

A medição da rugosidade não é uma tarefa trivial, isto porque os desvios de forma macrogeométricos, as ondulações e a rugosidade apresentam-se superpostos na superfície real da peça, sendo que os sinais de rugosidade apresentam maiores frequências (pequenos comprimentos de onda) e menores amplitudes que os desvios macrogeométricos. Portanto, durante a medição da rugosidade, devem-se aplicar filtros que permitam separar ou atenuar sinais com frequências mais baixas, isto é, Filtros Passa-alta.

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 (Fig. 2.14).

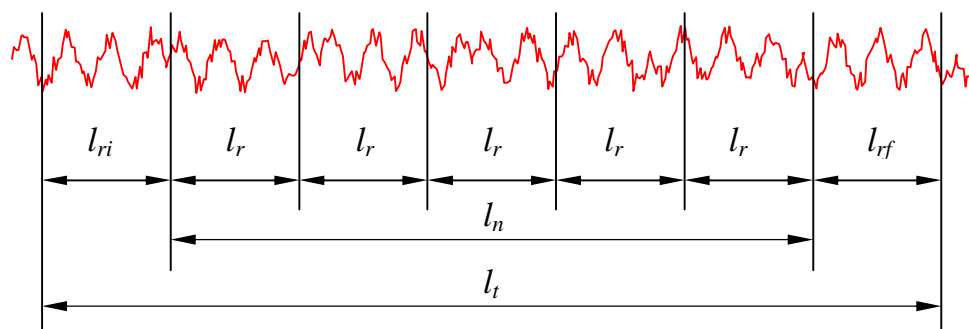


Figura 2.14 – Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994). Modificada.

Na Figura 2.14, tem-se que:

- *lri* (Percurso inicial): É a extensão da primeira parte do primeiro trecho. Ele não é utilizado na avaliação da rugosidade. Este trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição;

- *ln* (Percurso de medição ou comprimento de avaliação): É a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação;

- *lrf* (Percurso final): É a extensão da última parte do trecho apalpado, não utilizado na avaliação. O trecho final tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição;

- *lt* (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 deve ser igual a 5 (*lr*) mais a distância para atingir a velocidade de medição (*lri*) e para a parada do apalpador (*lrf*).

O comprimento de onda (amostragem ou *cut-off*), deve ser estimado de acordo com a Tab. 2.4 (ABNT NBR 4288, 2002).

Tabela 2.4– Comprimentos de amostragem para perfis não periódicos (ABNT NBR 4288, 2002).

Ra (μm)	Comprimento de amostragem da rugosidade – lr (mm)	Comprimento de avaliação da rugosidade – ln (mm)
$(0,006) < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

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). No sistema da linha média todos os parâmetros de rugosidade são definidos a partir do seguinte conceito:

“Linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem l_r ”.

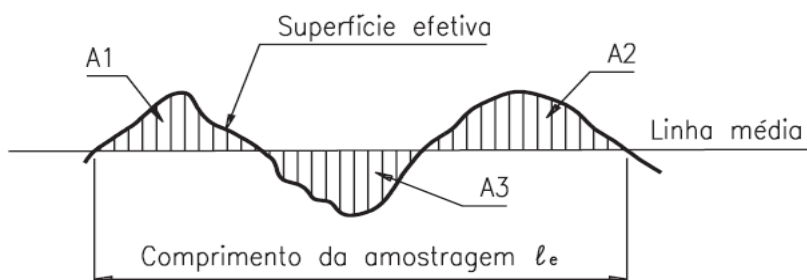


Figura 2.15 – Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

De acordo com a Fig. 2.15 tem-se que a soma das áreas A1 e A2 é igual a A3, conforme Eq. (2.1):

$$A_1 + A_2 = A_3 \quad (2.1)$$

Tomando como base o conceito de linha média, a ABNT NBR ISO 4287 (2002) divide os parâmetros geométricos que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade em três grupos: 1) Parâmetros de amplitude; 2) Parâmetros de espaçamento e 3) Parâmetros híbridos.

- 1) 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.
- 2) Parâmetros de Espaçamento: são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- 3) Parâmetros Híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

Esta norma apresenta, ainda, o nome e o símbolo destes parâmetros (Tab.2.5).

Tabela 2.5 – Parâmetros (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Parâmetros de amplitude (pico-vale)	Símbolo
Altura máxima do pico do perfil	R_p
Profundidade máxima do vale do perfil	R_v
Altura máxima do perfil	R_z
Altura média dos elementos do perfil	R_c
Altura total do perfil	R_t
Parâmetros de amplitude (média das coordenadas)	Símbolo
Desvio aritmético médio do perfil avaliado	R_a
Desvio médio quadrático do perfil avaliado	R_q
Fator de assimetria do perfil avaliado (<i>Skewness</i>)	R_{sk}
Fator de achatamento do perfil avaliado (<i>Kurtosis</i>)	R_{ku}
Parâmetros de espaçamento	Símbolo
Largura média dos elementos do perfil	R_{sm}
Parâmetros híbridos	Símbolo
Inclinação quadrática média do perfil avaliado	R_{Aq}

A ABNT NBR ISO 4287 (2002) especifica, ainda, algumas curvas que podem ser utilizadas para avaliar a rugosidade, Tab. 2.6.

Tabela 2.6 – Curvas e parâmetros relacionados (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Curvas e parâmetros relacionados	Símbolo
Razão material do perfil	$Rmr(c)$
Curva da razão portante do perfil	<i>(Curva de Abbott Firestone)</i>
Diferença de altura na seção do perfil	$R\delta c$
Razão portante relativa	Rmr
Curva de amplitude das alturas do perfil	–

Neste trabalho são apresentados os seguintes parâmetros:

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

Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$, em relação à linha média num comprimento de amostragem l_r , dada pela Eq.(2.2).

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2.2)$$

Vantagens do parâmetro Ra :

- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo;
- É aplicável à maioria dos processos de fabricação;
- Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica);
- Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor;
- Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de *Gauss*, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Desvantagens do parâmetro Ra :

- O valor de Ra 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;

- O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem;
- Nenhuma distinção é feita 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, lr , Eq. (2.3).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (2.3)$$

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 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) (ABNT NBR 4287, 2002). Este parâmetro informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça.

Em outras palavras, Piratelli-Filho (2011) define como sendo a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ln , independente dos valores de rugosidade parcial (Z_i), Fig. 2.16.

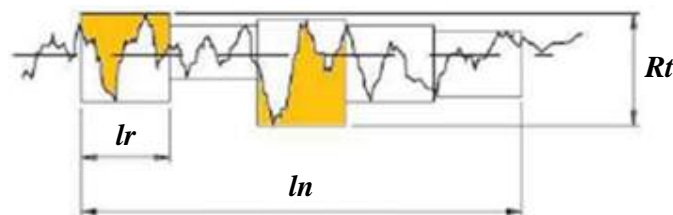


Figura 2.16 – Altura total do perfil (PIRATELLI-FILHO, 2011).

Vantagens do parâmetro Rt :

- Informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça;
- É de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície;
- Tem grande aplicação na maioria dos países e fornecimento de informações complementares ao Ra (PIRATELLI-FILHO, 2011).

Este parâmetro é mais rígido na avaliação que o parâmetro Rz , tornando mais fácil a obtenção do gráfico de superfície, no entanto essa rigidez de avaliação pode levar a resultados enganosos.

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.

d) *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. (2.4).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (2.4)$$

Onde lr 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. 2.17).

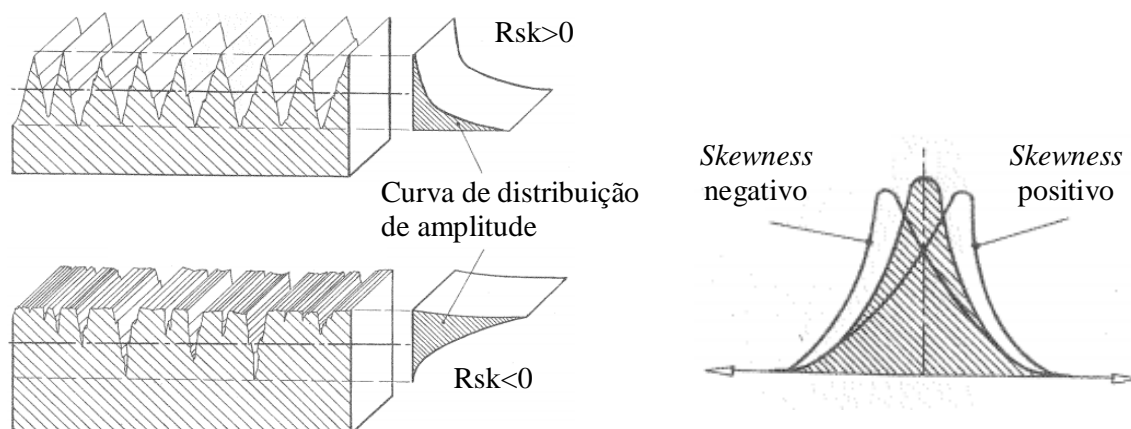


Figura 2.17 – Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

e) *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 (lr), sendo expresso pela Eq. (2.5).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad (2.5)$$

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. 2.18.

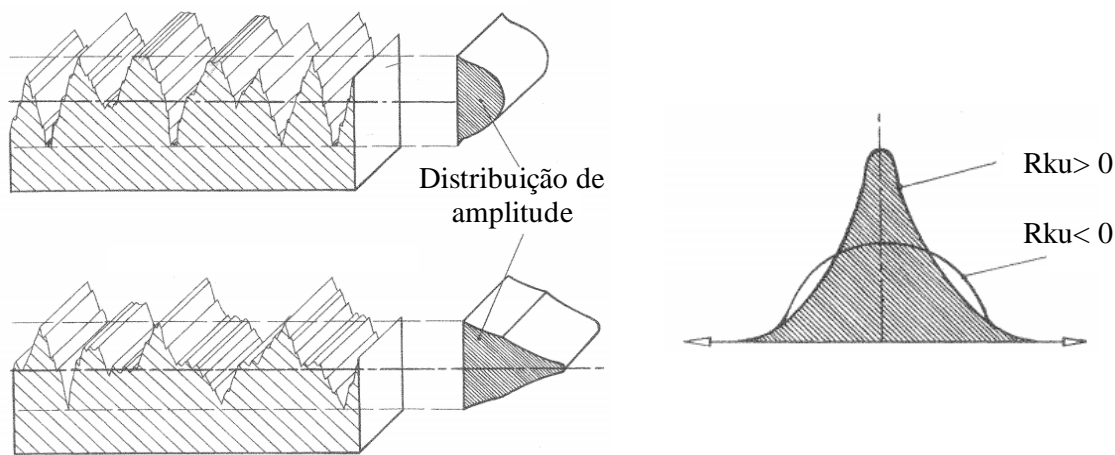


Figura 2.18 – Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

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. 2.19).

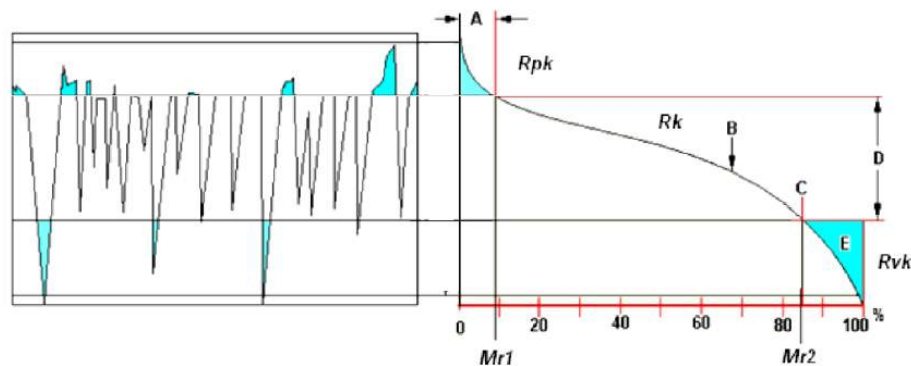


Figura 2.19 – Curva de *Abbott-Firestone* (TAYLOR HOBSON, 2000).

A curva de *Abbott-Firestone* é definida a partir de três parâmetros (Rk , Rvk e Rpk) e duas fronteiras ($Mr1$ e $Mr2$) (JUNIOR, 2009):

f) *Rugosidade do núcleo do perfil- Serie (Rk)*

É o parâmetro associado à parte intermediária da rugosidade e que influência no desempenho de certas superfícies. Ele quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato.

g) *Região de pico (Rpk)*

É o valor da rugosidade média dos picos que estão acima da área de contato mínima do perfil (excluídos eventuais picos exagerados). Este parâmetro está associado à região que se desgasta nos primeiros contatos relativos entre as superfícies.

h) Região de vale (Rvk)

É o valor da rugosidade média dos vales que estão abaixo da área de contato do perfil (excluídos eventuais vales excessivamente profundos). Este parâmetro está relacionado com a capacidade da superfície em reter algum tipo de fluido, sendo amplamente empregado na indústria automotiva e aeroespacial, pois os motores de compressão interna requerem precisão de pontos específicos de lubrificação e retenção de fluido simultaneamente (TAYLOR HOBSON, 2000).

$Mr1$ é a fração de contato mínimo: taxa, em porcentagem, que determina a fração de contato mínima no núcleo do perfil de rugosidade.

$Mr2$ é a fração de contato máximo: taxa, em porcentagem, que 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 componente horizontal corresponde a 40%, conforme representado na Fig. 2.19 (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%).

2.4. Incerteza de medição

Ao realizar-se a medição de uma grandeza física, deve-se expressar alguma indicação quantitativa da qualidade deste resultado, a fim de avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação não é possível comparar resultados de medição entre eles mesmos ou com valores de referência numa especificação ou numa norma. Portanto faz-se necessário a existência de um procedimento de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade de um resultado de medição, ou seja, avaliar e expressar sua incerteza.

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.

De acordo com o ISO TAG 4/WG 3 (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. Este documento também conceitua três tipos de incerteza: a incerteza padrão, a incerteza padrão combinada e a incerteza expandida. A incerteza padrão está relacionada a cada grandeza de influência e é obtida através da análise individual de cada variável considerada, através de uma avaliação do Tipo A (Avaliação com auxílio de métodos estatísticos) ou do Tipo B (Outros métodos que não a análise estatística de séries de observações).

Ao compreender o efeito dessas grandezas, é possível relacioná-las por meio da lei de propagação de incertezas obtendo-se assim, a incerteza padrão combinada. Por sua vez, a incerteza expandida fornece um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando. É obtida através da multiplicação do valor da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência (k). A escolha de k , que está geralmente entre 2 e 3, é baseada na probabilidade de abrangência ou nível da confiança requerido do intervalo.

2.4.1. Avaliando a incerteza-padrão

Para aplicação da metodologia proposta no ISO TAG 4/WG 3 (2008) é preciso formular um modelo matemático que englobe todas as variáveis que influenciam no processo de medição da grandeza em questão, sendo possível construir a seguinte relação funcional, conforme Eq. (2.6):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.6)$$

A partir da Eq.(2.6), 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. (2.7):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.7)$$

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. Portanto, se dados indicam que f não modela a medição no grau imposto pela exatidão requerida do resultado de medição, devem-se incluir grandezas de entrada adicionais em f para eliminar esta inadequação. Isto pode requerer a introdução de uma grandeza de entrada que reflita o conhecimento incompleto de um fenômeno que afeta o mensurando.

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. O conjunto de leituras realizadas no instrumento de medição constitui um exemplo de variável cuja incerteza é classificada como do tipo A, apresentando distribuição normal e $n-1$ graus de liberdade. E pode ser calculada utilizando-se a Eq. (2.8).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.8)$$

Onde:

- s é o desvio padrão experimental;
- n é o número de elementos da amostra.

Segundo o ISO TAG 4/WG 3 (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.

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;
- 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. 2.20.

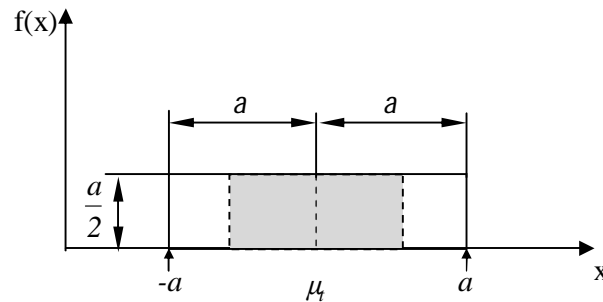


Figura 2.20 –Distribuição retangular (ISO TAG 4/WG 3, 2008).

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. (2.9).

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (2.9)$$

O uso da distribuição retangular é recomendado quando se dispõe de pouca informação sobre uma determinada variável.

Às vezes, é mais realista esperar que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio, assim faz se necessário o uso de uma distribuição trapezoidal simétrica, Fig. 2.21, com uma base de largura $a_+ - a_- = 2a$ e topo igual a $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$.

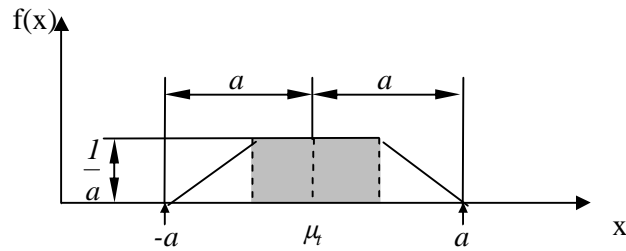


Figura 2.21– Distribuição trapezoidal (ISO TAG 4/WG 3, 2008).

Neste caso a incerteza padrão é dada pela Eq. (2.10). Como X_i pode assumir infinitos valores conseqüentemente o seu grau de liberdade é infinito.

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1+\beta^2)}{6} \quad (2.10)$$

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

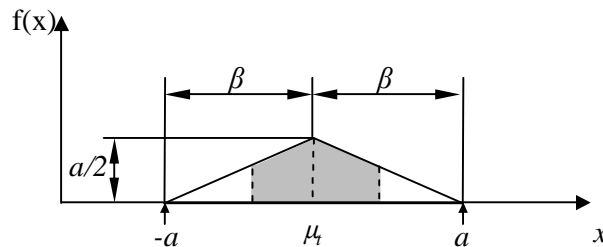


Figura 2.22– Distribuição triangular (ISO TAG 4/WG 3, 2008).

A incerteza padrão do tipo B associada a uma grandeza com distribuição triangular é expressa a partir da Eq. (2.11).

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{6} \quad (2.11)$$

Conhecendo todos os valores das incertezas-padrão, calcula-se a incerteza-padrão combinada. Para isso, um modelo matemático deve ser previamente definido, pois ele é a base para a aplicação da metodologia proposta no ISO TAG 4/WG 3 (2008).

2.4.4. Determinando a incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é um desvio-padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando Y .

Para determinação da incerteza padrão combinada o ISO TAG 4/WG 3 (2008) divide as grandezas de entrada em dois grupos, descritos a seguir.

- 1) 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. (2.12):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.12)$$

Onde f é a função que modela matematicamente o processo de medição, Eq.(2.7).

Como pode ser observado a Eq.(2.12) é baseada em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor e expressa a lei de propagação da incerteza.

- 2) Quando as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada, associada com o resultado de uma medição é dada por 2.13:

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

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.

O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado pela Eq. (2.14):

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2.14)$$

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 $(\Delta y)_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) (\Delta x_i)$. 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. (2.15):

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.15)$$

De acordo com ISO TAG 4/WG 3(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 $y - U \leq Y \leq y + U$.

O valor do fator de abrangência k é definido a partir do nível de confiança escolhido para o intervalo $y - U$ a $y + U$.

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. (2.16).

$$\nu_{efetivo} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(x)}{\nu_i}} \quad (2.16)$$

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

De acordo com INMETRO (2008) a metodologia de cálculo proposto pelo ISO TAG 4/WG 3 (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 método 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 ;
- Estimativa da incerteza expandida.

As quatro primeiras etapas da técnica MC são idênticas à metodologia de cálculo do ISO TAG 4/WG 3 (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.

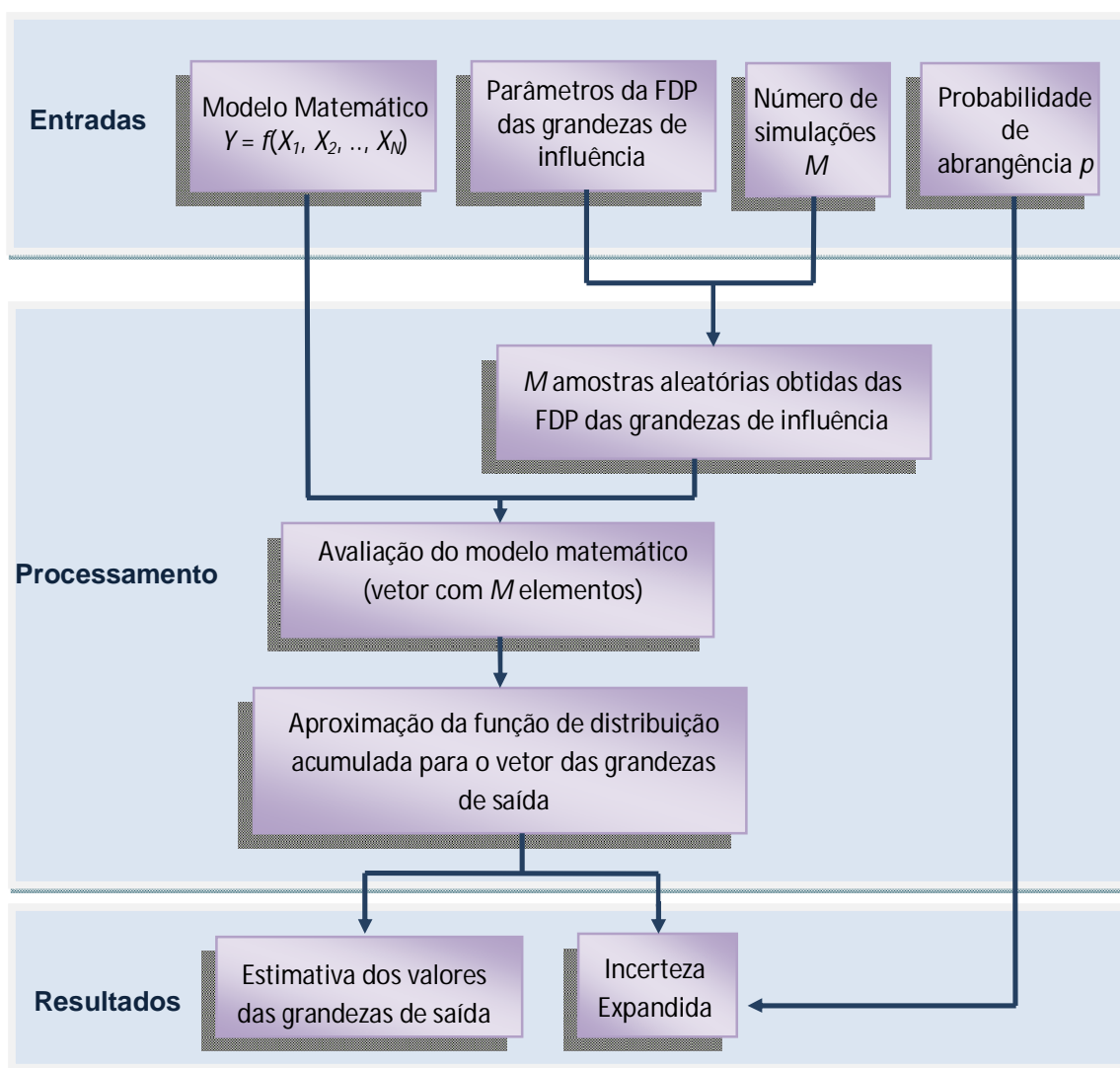


Figura 2.23 – Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição utilizando o MC.

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. (2.17):

$$y_r = f(x_r), \quad r = 1, \dots, M. \quad (2.17)$$

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:

- a) 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 $y(r)$, $r = 1, \dots, M$;
- b) 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;
- c) 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.(2.18), enquanto que o desvio-padrão, $u(y)$ é determinado pela Eq.(2.19):

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r \quad (2.18)$$

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \bar{y})^2} \quad (2.19)$$

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.(2.20), onde p representa a probabilidade e M o número de iterações.

$$q = pM \quad (2.20)$$

A Equação (2.20) é válida apenas quando q for um número inteiro. Caso contrário, q é determinado pela Eq. (2.21):

$$q = pM + \frac{1}{2} \quad (2.21)$$

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).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia proposta para o desenvolvimento do presente trabalho e foi dividido em cinco etapas: brunimento convencional; avaliação dimensional; avaliação geométrica; incerteza de medição e brunimento flexível. As etapas foram realizadas em 15 cilindros de blocos de compressores herméticos, inicialmente usinados pelo processo de brunimento convencional com ferramenta precidor, operação efetuada pela EMBRACO.

Neste trabalho, adicionalmente realizou-se o brunimento flexível dos cilindros, em uma máquina fresadora 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 princípio foi necessário cortar parte do bloco, devido a sua geometria complexa que impedia sua fixação tanto nas castanhas da fresadora, quanto em outros equipamentos de medição utilizados para as avaliações descritas a seguir.

A avaliação da qualidade dimensional e geométrica do cilindro foi efetuada após ambas as operações de usinagem. Para tanto, a avaliação dimensional consistiu na análise da exatidão do diâmetro, enquanto a geométrica na verificação do desvio de cilindridade, do desvio de circularidade e da rugosidade. Para todos os mensurandos foi determinada a incerteza de medição.

Todas as peças foram identificadas com números de 1 (um) a 15 permitindo assim a comparação dos resultados obtidos em cada etapa.

3.1. Brunimento convencional

O brunimento convencional foi efetuado em 15 cilindros de blocos de compressores herméticos, na planta brasileira da EMBRACO, cujos parâmetros de corte foram definidos pela empresa e são apresentados a seguir na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de corte para brunimento convencional (EMBRACO, 2014).

Rotação (m/min)	Brunidor de desbaste: 550 rpm
	Brunidor de semi-acabamento: 550 rpm
	Brunidor de acabamento: 500 rpm
Profundidade de Corte (mm)	0,014
Avanço (mm/min)	300

A execução da usinagem foi realizada em uma máquina brunidora vertical multifuso, do fabricante Gehring (Fig. 3.1), utilizando um conjunto de três brunidores, sendo um de desbaste (120mesh), um de semi-acabamento (270mesh) e um de acabamento (600mesh). Ainda, foram efetuados dois golpes em cada operação.



Figura 3.1 – Brunidora Vertical Automática da Gehring (GEHRING, 2014).

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

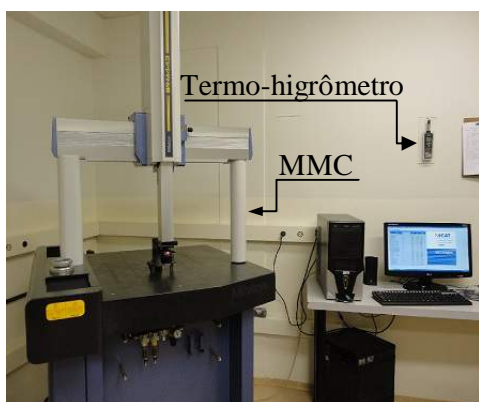
3.2. Avaliação dimensional do cilindro

A medição do diâmetro do cilindro foi efetuada, inicialmente, por meio de uma máquina de medir a três coordenadas (MMC). Entretanto, devido a uma falha durante a etapa de calibração da ponta foi necessário utilizar outro sistema de medição, neste caso um micrômetro interno. Assim sendo, ambos os procedimentos de medição são descritos a seguir separadamente.

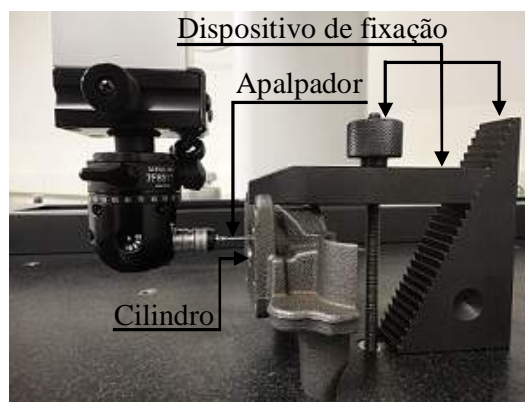
3.2.1. Medição do diâmetro do cilindro com a MMC

A máquina de medir a três coordenadas utilizada para medição do diâmetro dos cilindros é do tipo Ponte Móvel, do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443(Fig.3.2a). Esta máquina possui resolução de 0,001mm e capacidade de medição de 400 mm, 400 mm e 300 mm para os eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente. Durante a medição, foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro, enquanto que para o armazenamento e processamento dos dados foi utilizado o programa computacional dedicado MCosmos 3.0[®].

O certificado de calibração da máquina, n° 07081/13, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana (ANEXO 1) declara que o erro de apalpamento da MMC é de $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$, sendo a incerteza linear associada ao eixo *X* de $0,8 + L/1500 \mu\text{m}$, para o eixo *Y* de $0,8 + L/3000 \mu\text{m}$ e para o eixo *Z* de $0,9 + L/3000 \mu\text{m}$, onde *L* representa o valor do comprimento medido em milímetros.



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Máquina de medir a três coordenadas e (b) fixação do bloco na mesa de medição.

Durante a medição, os blocos foram fixados a mesa de medição da máquina através de um conjunto de dispositivos dedicados a este fim (Fig. 3.2b).

Foi efetuado um ciclo de cinco medições para determinar o diâmetro de cada cilindro. Para tanto, foram apalpados 15 pontos na superfície deste considerando uma única secção transversal. Estes pontos foram distribuídos de forma a obter uma amostra representativa dos infinitos pontos da superfície avaliada. A fim de garantir a medição apenas no plano XZ, a entrada de ar do mancal do eixo Y da MMC foi fechada.

Após a medição do diâmetro de dois cilindros, identificados como bloco 7 e 13, usinado pelo brunimento convencional, houve uma falha na etapa de calibração da ponta. O programa computacional dedicado MCosmos 3.0[®] informava uma diferença máxima durante a calibração da ponta maior que 2 μm , impossibilitando o uso desta máquina. Por tal motivo foi necessário utilizar outro sistema de medição. O único equipamento disponível, com faixa nominal adequada para a medição, consistia em um micrômetro interno cuja resolução é de 0,005 mm.

É importante ressaltar que todas as medições realizadas neste trabalho foram feitas no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD), com exceção da medição da rugosidade sem contato, realizada no Laboratório de Atrito e Desgaste (LTAD), ambos da Universidade Federal de Uberlândia e conduzidas à temperatura ambiente controlada de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, conforme recomendado pela ABNT NBR NM-ISO 1 (ABNT, 1997). Para monitoramento da mesma, um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 $^\circ\text{C}$ e faixa nominal de -20°C a 60°C foi utilizado. Este equipamento possui certificado de calibração N. R4996/13 (ANEXO 2), emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação. Para a temperatura, a incerteza expandida é de 0,3 $^\circ\text{C}$ 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.

3.2.2. *Medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno*

O micrômetro interno utilizado para medir o diâmetro do cilindro é do fabricante Mitutoyo (Fig.3.4), com faixa nominal de 20 mm a 25 mm e resolução de 0,005 mm. Este equipamento foi calibrado utilizando um anel padrão.

Para realizar a calibração do anel padrão, foi utilizada uma máquina universal de medir comprimentos (MUC), do fabricante Carl Zeiss Jena, analógica com faixa nominal de 100 mm e resolução de 0,1 μm (Fig. 3.3a). Este equipamento possui certificado de calibração

nº 0009/2012 (ANEXO 3), emitido pelo laboratório de metrologia dimensional da UFU. De acordo com este certificado, a incerteza expandida associada à calibração da máquina é de $0,2 \mu\text{m}$ para $k = 1,90$ e probabilidade de abrangência de 95%.

O anel padrão utilizado é do fabricante Mitutoyo e possui gravado em uma de suas faces o valor convencional de 20,021mm. Durante a calibração, o mesmo foi posicionado na mesa de medição da máquina universal de forma que as pontas de medição para interno tivessem acesso à superfície do furo (Fig. 3.3b). Foi realizado um ciclo de dez medições. A seguir, calculou-se a média aritmética e o desvio-padrão dos valores indicados. Por fim, a incerteza expandida associada à calibração deste anel foi avaliada conforme descrito neste capítulo em “Incerteza de Medição”.

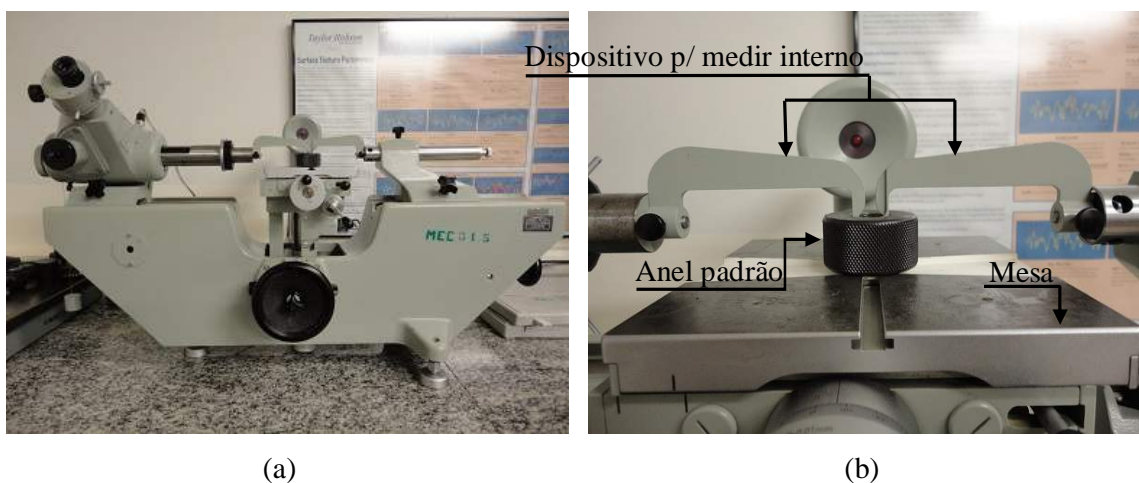


Figura 3.3 – (a) Máquina universal de medir comprimentos (b) utilizada na medição do diâmetro do anel padrão.

Finalizada esta etapa, posicionou-se o anel sobre uma mesa de desempenho e efetuou-se um ciclo de dez medições de seu diâmetro utilizando o micrômetro interno, com o objetivo de calibrá-lo (Fig. 4.4a). Cabe ressaltar que antes de iniciar as medições foi realizado o ajuste do zero no micrômetro. Ao término de cada procedimento de calibração, elaborou-se o certificado de calibração do anel padrão (APÊNDICE 1) e do micrômetro interno (APÊNDICE 2). Posteriormente, a medição do diâmetro dos cilindros foi efetuada em um ciclo de cinco medições, posicionando o bloco sobre uma mesa de desempenho (Fig.4.4b).

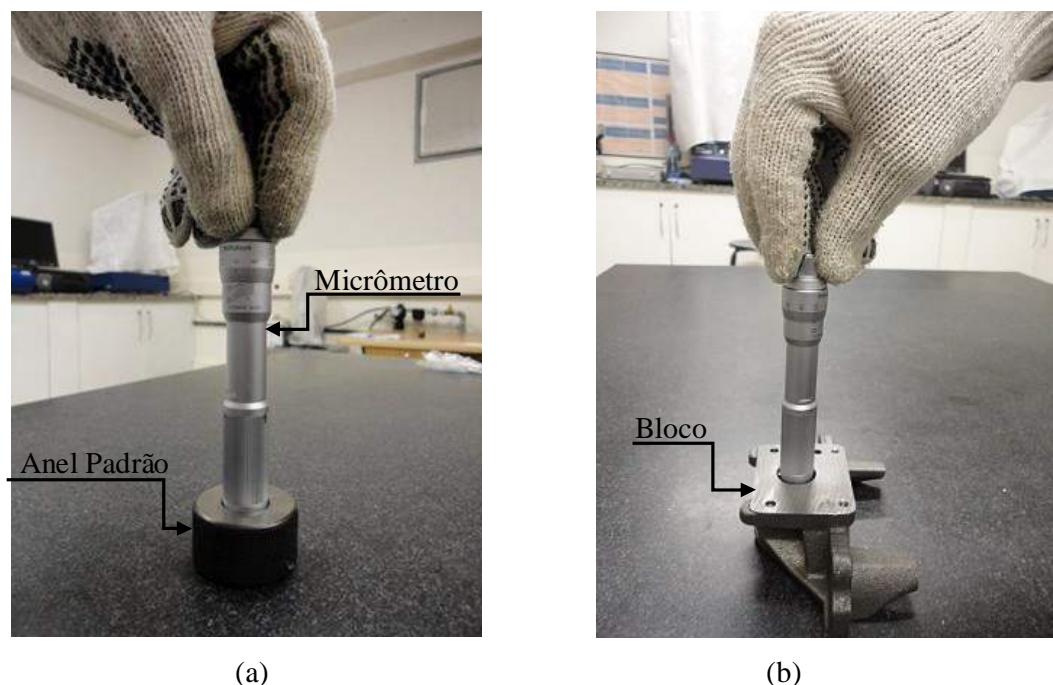


Figura 3.4 – (a) Medição do diâmetro interno do anel padrão e (b) medição do diâmetro do cilindro do bloco de um compressor hermético com micrômetro para medir internos.

3.3. Avaliação geométrica do cilindro

A avaliação geométrica foi dividida em três tópicos: medição dos desvios de circularidade e de cilindridade; medição da rugosidade com contato e medição da rugosidade sem contato.

3.3.1. Medição dos desvios de circularidade e de cilindridade do cilindro

Os desvios geométricos de circularidade e de cilindridade foram medidos em uma máquina de medir desvios de forma (MMDF) fabricada pela Taylor Hobson, modelo Talyrond 131, Fig. 3.5a. Este instrumento apresenta resolução de $0,01 \mu\text{m}$ com faixa de medição no eixo vertical de 250 mm e no eixo horizontal de 180 mm. Possui apalpador de ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. De acordo com o certificado de calibração nº 018/13 da MMDF (ANEXO 4), a incerteza expandida associada à calibração da máquina é de $0,011 \mu\text{m}$, para k igual a 1,97 e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

O processo de medição foi gerenciado por meio de um programa computacional dedicado chamado Ultra, responsável pelo movimento da agulha apalpadora e da mesa. O programa armazena e processa os dados, apresentando os valores numéricos dos desvios e sua representação geométrica. Nesta etapa foi necessário cortar parte do bloco devido a sua geometria complexa, tornando possível sua fixação nas castanhas da máquina (Fig. 3.5b).

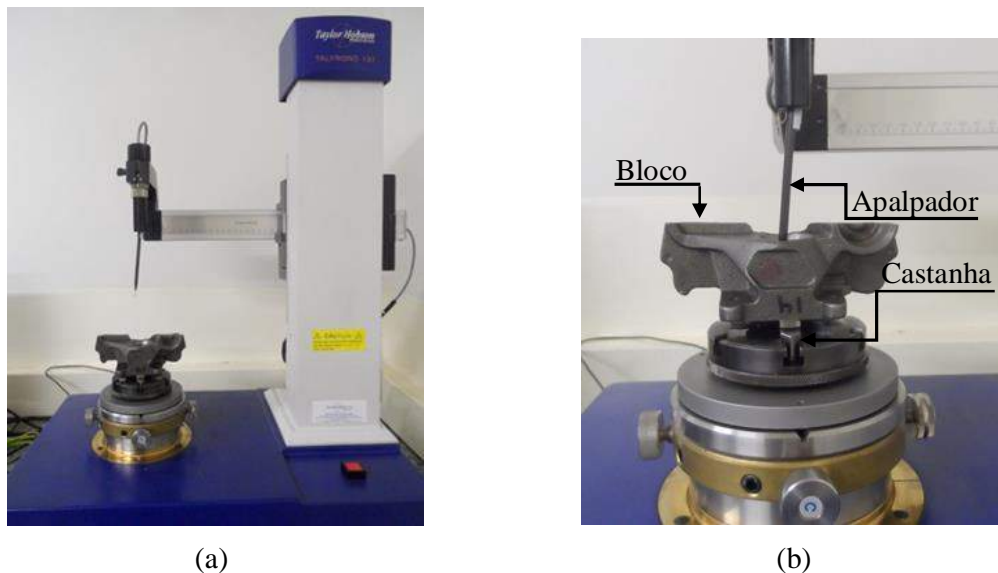


Figura 3.5 – (a) Máquina de medir desvios de forma e (b) fixação do bloco após cortado.

Com o objetivo de verificar os desvios de cilindridade e de circularidade, foram selecionados três planos ao longo do cilindro, distribuídos em espaçamentos iguais a 2 mm a partir da base plana do bloco e efetuado um ciclo de cinco medições.

Para obter os valores dos desvios de circularidade, o programa computacional dedicado traçou o perfil real da parede do cilindro, determinado pela circunferência percorrida pela ponta apalpadora, conforme o plano de medição informado. Sobre o perfil real foram traçadas duas circunferências concêntricas, a maior inscrita e a menor circunscrita, onde a diferença radial entre estas foi atribuída o valor do erro de circularidade (ABNT 6490, 1997).

Os desvios de cilindridade, por sua vez, foram medidos simultaneamente com os de circularidade. Para calcular a cilindridade o programa computacional traça o perfil real do cilindro, gerado pelo deslocamento da ponta apalpadora ao longo do furo, nos três planos pré-definidos. Sobre o cilindro real foram traçados dois cilindros coaxiais, o maior inscrito e o menor circunscrito, onde a diferença radial entre estes dois cilindros foi determinada como o erro de cilindridade (ABNT 6490, 1997).

3.3.2. Medição com contato da rugosidade do cilindro

A medição da rugosidade com contato 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 $5 \mu\text{m}$ (Fig.3.6a). Este instrumento apresenta certificado de calibração nº 0001/2013 emitido pelo LMD (ANEXO 5), que declara a incerteza expandida associada à calibração igual a $0,03 \mu\text{m}$ para k igual a 2,31 e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

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

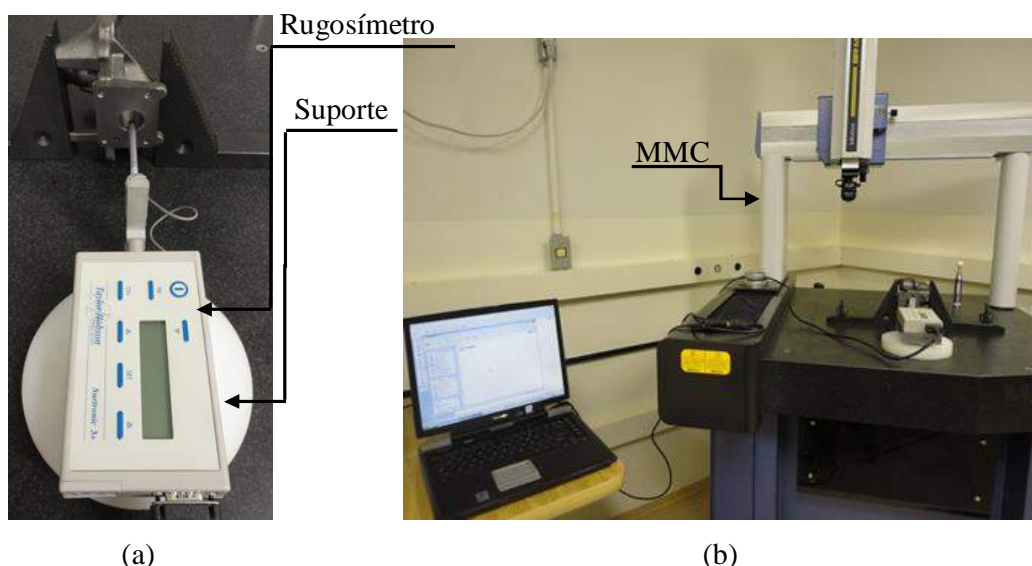


Figura 3.6 – (a) Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson apoiado em um suporte e (b) posicionado na mesa de desempenho da MMC.

A fim de minimizar o efeito das vibrações mecânicas transmitidas pelo solo, o rugosímetro e o bloco foram posicionados sobre a mesa de medição da máquina de medir a três coordenadas, Fig.3.6b. A peça foi fixada na mesa utilizando um conjunto de dispositivos dedicados a este fim.

Foram realizados quatro ciclos de cinco medições. Cada ciclo representa uma posição distinta, determinadas como posição 1 (Fig.3.7a), posição 2 (Fig.3.7b), posição 3 (Fig.3.7c) e posição 4 (Fig.3.7d). Ainda, foi utilizado um suporte disponível no LMD, para levantar o rugosímetro para as duas últimas posições (Fig.3.6a).

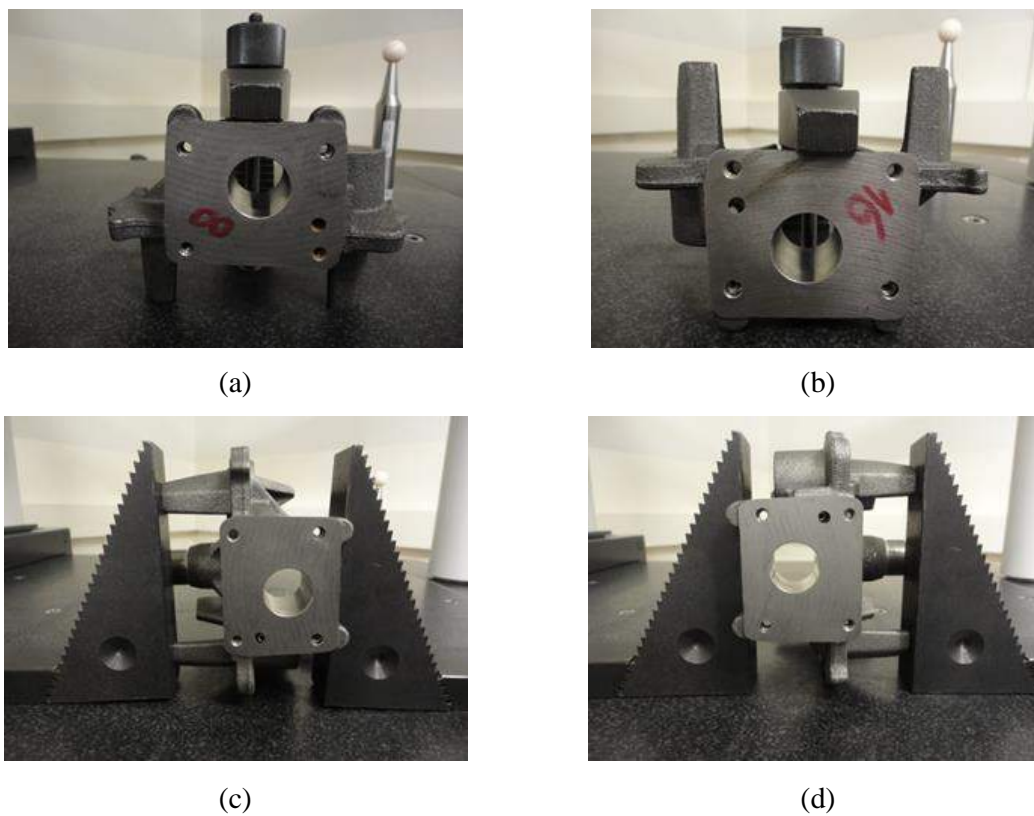


Figura 3.7 – Posições adotadas durante a medição da rugosidade do cilindro: (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3 e (d) Posição 4.

A coleta dos dados foi realizada através do programa computacional Talysurf Gold 4.0, fornecido pelo fabricante do respectivo rugosímetro, Fig.3.8.

Aproveitando a excelente capacidade de diagnóstico do programa, a rugosidade de cada peça foi medida cinco vezes para os seguintes parâmetros de rugosidade:

1. R_a (Desvio Aritmético Médio do Perfil);
2. R_q (Desvio Aritmético Quadrático do Perfil);
3. R_t (Altura total do Perfil);
4. R_{sk} (Fator de Assimetria do Perfil - *Skewness*);
5. R_{ku} (Fator de Achatamento - *Kurtosis*);
6. R_{vk} (Região de pico);
7. R_{pk} (Região de vale);
8. R_k (Rugosidade do núcleo do perfil).

Através do programa computacional também foram obtidos a curva de *Abbott-Firestone* e o perfil de rugosidade.

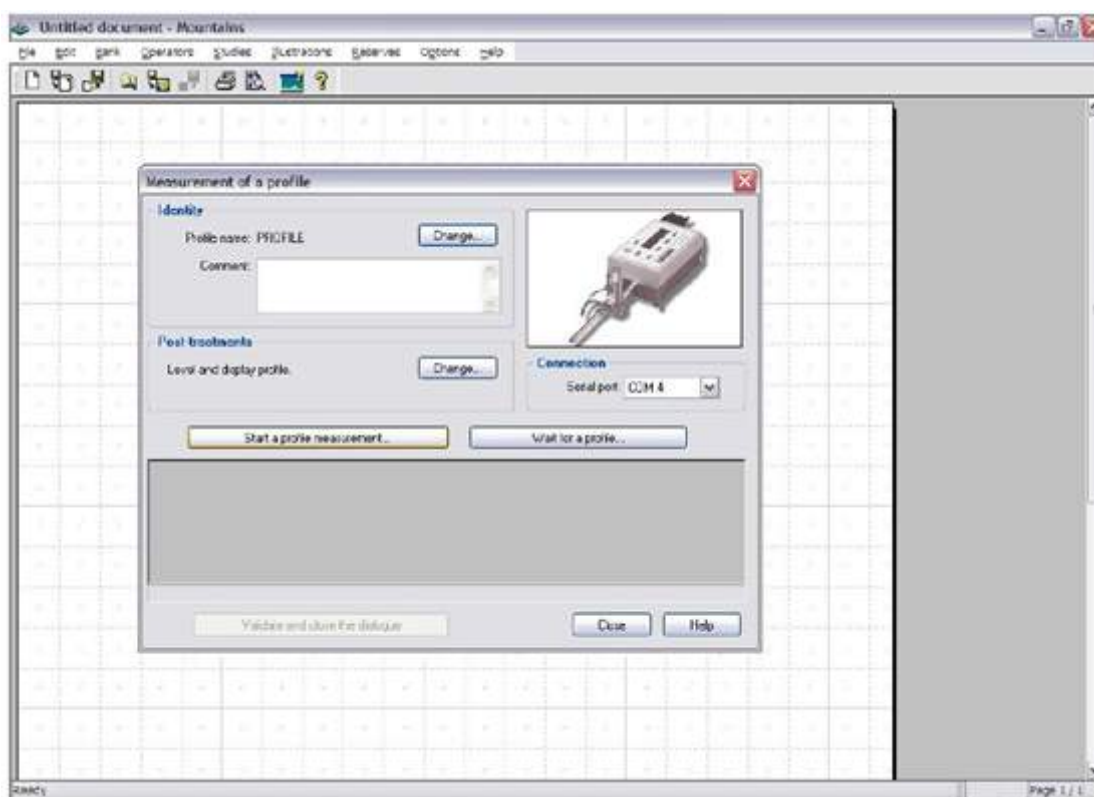


Figura 3.8 - Interface gráfica do programa computacional Talyprofile Gold 4.0.

3.3.3. Medição sem contato da rugosidade do cilindro

Esta etapa foi efetuada somente em duas peças, devido à necessidade de cortar o cilindro ao meio. Portanto foram selecionadas duas peças usinadas por ambos os processos. A medição foi realizada no Laboratório de Atrito e Desgaste (LTAD) da UFU por meio de um interferômetro, modelo TALYSURF CLI 2000 fabricado pela Taylor Hobson (Fig. 3.9a). Para fixação da peça na mesa da máquina, foi utilizada massa para modelar (Fig. 3.9b). Durante a medição foi utilizada a luz branca, que permite obter resultados com resolução de $0,01 \mu\text{m}$.

A incerteza expandida associada à calibração do interferômetro (ANEXO 6) é de $0,016 \text{ mm}$ para k igual a 2,16 e 17 graus de liberdade efetivos. A distribuição adotada, neste caso foi a normal para 95,45% de probabilidade de abrangência.

Nesta etapa foram realizadas medições sem contato da rugosidade em duas e três dimensões. Na medição em 3D, para ambas as peças avaliou-se uma área de 1 mm^2 com espaçamento entre pontos e entre linhas de $2 \mu\text{m}$ e velocidade de medição de $50 \mu\text{m/s}$. Nestas condições o tempo de cada medição foi de 40 minutos. Para a medição em 2D, efetuaram-se cinco ciclos de medição, utilizando o comprimento de amostragem de $0,8 \text{ mm}$ e o filtro

Gaussiano. A coleta dos dados foi efetuada através do programa computacional TALYSURF CLI 2000 (Fig. 3.10), que apresenta uma interface gráfica bastante amigável com o usuário.

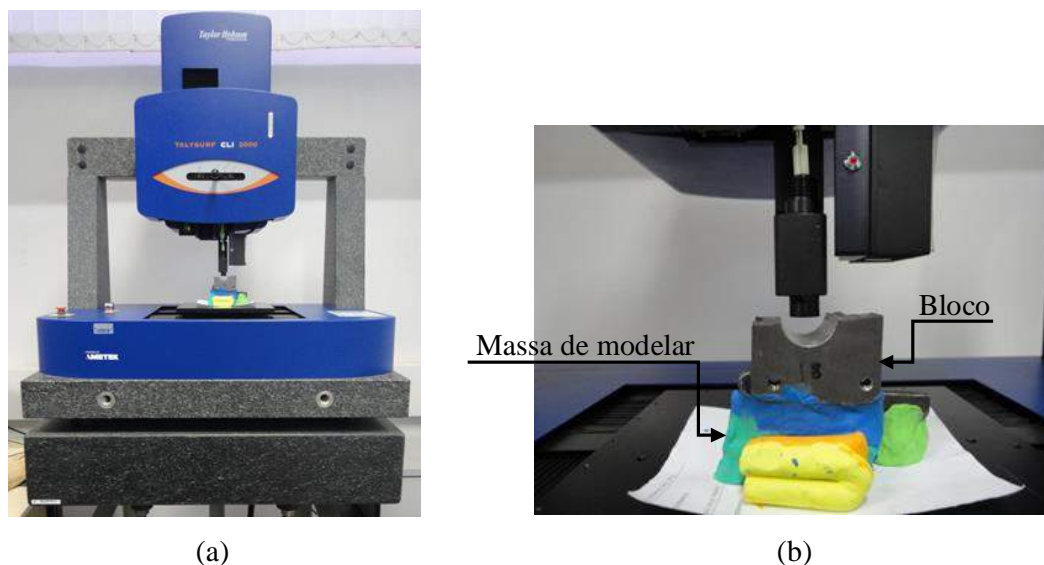


Figura 3.9 - (a) Interferômetro da Taylor Hobson, modelo TALYSURF CLI 2000, (b) peça apoiada sobre a mesa e fixada com massa de modelar.

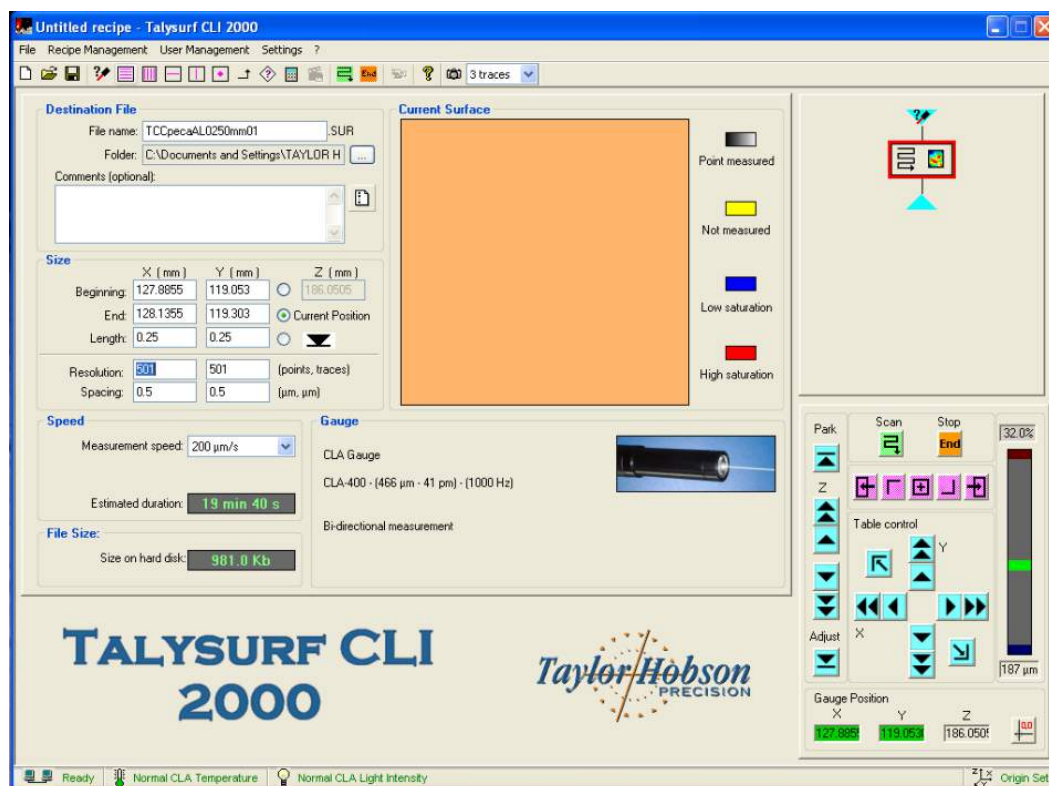


Figura 3.10 – Interface gráfica do programa TALYSURF CLI 2000.

3.4. 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 o diâmetro, os desvios de circularidade e de cilindricidade foi utilizada a metodologia proposta no ISO TAG 4WG-3 (2008) e as planilhas desenvolvidas por Moraes (2001), enquanto para a rugosidade foi aplicado o método de Monte Carlo (MC) conforme recomenda INMETRO (2008).

Conforme comentado no início do capítulo, todas as medições foram realizadas a $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, portanto as variáveis afastamento da temperatura em relação a $20 ^\circ\text{C}$ e variação da temperatura durante a medição não foram aqui consideradas durante a avaliação da incerteza.

3.4.1. Incerteza associada à medição do diâmetro do cilindro

Esta etapa é apresentada em dois itens: (1) incerteza associada à medição do diâmetro com MMC e (2) incerteza associada à medição do diâmetro com micrômetro interno.

3.4.1.1. Incerteza associada à medição do diâmetro com MMC

É apresentado a seguir na Eq. (3.1), o modelo matemático para cálculo da incerteza associada à medição do diâmetro do cilindro por meio da MMC, seguido da identificação das variáveis de influência (SOUZA *et al.*, 2011).

$$D_{MMC} = \Delta s(L_{MMC}) + \Delta R_{MMC} + \Delta IC_{MMC} + \Delta E \quad (3.1)$$

Em que as variáveis de influência são:

- D_{MMC} : diâmetro do cilindro medido com a MMC;
- $\Delta s(L_{MMC})$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pela MMC;
- ΔR_{MMC} : correção associada à resolução da MMC;
- ΔIC_{MMC} : correção associada à incerteza padrão da calibração da MMC nos eixos X, Y e Z;
- ΔE : correção associada ao erro de apalpamento da MMC;

Em seguida, são apresentados na Tab. 3.2, os tipos de distribuição adotados e respectivas equações para cálculo da incerteza-padrão das variáveis de influência, bem como o número de graus de liberdade.

Tabela 3.2 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição do diâmetro com MMC.

Variável	Distribuição	Incerteza-Padrão	Graus de liberdade
$\Delta s(L_{MMC})$	<i>T-Student</i>	$u(s(L_{MMC})) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	$n-1$
ΔR_{MMC}	Retangular	$u(R_{MMC}) = \frac{\text{Re solução}}{2\sqrt{3}}$	∞
ΔIC_{MMC}	<i>T-Student</i>	$u(IC_{MMC}) = \frac{U(IC_{MMC})}{k_{MMC}}$	∞
ΔE	Retangular	$u(E_{MMC}) = \frac{E}{\sqrt{3}}$	∞

3.4.1.2. Incerteza associada à medição do diâmetro com micrômetro interno

Abaixo são apresentados os modelos matemáticos para cálculo da incerteza associada à calibração do anel padrão (Eq. 3.2), à calibração do micrômetro interno (Eq. 3.3) e a medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno (Eq. 3.4), seguido da identificação das variáveis de influência.

$$IC_{AP} = \Delta s(L_{MUC}) + \Delta R_{MUC} + \Delta IC_{MUC} \quad (3.2)$$

$$IC_{MI} = \Delta s(L_{AP}) + \Delta R_{MI} + \Delta IC_{AP} \quad (3.3)$$

$$D_{MI} = \Delta s(L_{MI}) + \Delta R_{MI} + \Delta IC_{MI} \quad (3.4)$$

Em que as variáveis de influência são:

- IC_{AP} : incerteza associada à calibração do anel padrão;
- IC_{MI} : incerteza associada à calibração do micrômetro interno;
- D_{MI} : diâmetro do cilindro medido com micrômetro interno;
- $\Delta s(L_{MUC})$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pela MUC;

- $\Delta s(L_{AP})$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do anel padrão;
- $\Delta s(L_{MI})$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pelo micrômetro interno na medição do diâmetro do cilindro;
- ΔR_{MUC} : correção associada à resolução da MUC;
- ΔR_{MI} : correção associada à resolução do micrômetro interno;
- ΔIC_{MUC} : correção associada à incerteza padrão da calibração da MUC;
- ΔIC_{AP} : correção associada à incerteza padrão da calibração do anel padrão;
- ΔIC_{MI} : correção associada à incerteza padrão da calibração do micrômetro interno;

São apresentados na Tab. 3.3, os tipos de distribuição adotados e respectivas equações para cálculo da incerteza-padrão das variáveis de influência, bem como o número de graus de liberdade.

Tabela 3.3 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à calibração do anel padrão, à calibração do micrômetro interno e a medição do diâmetro com micrômetro interno.

Variável	Distribuição	Incerteza-Padrão	Graus de liberdade
$\Delta s(L_{MUC})$	<i>T-Student</i>	$u(s(L)) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	<i>n-1</i>
$\Delta s(L_{AP})$			
$\Delta s(L_{MI})$			
ΔR_{MUC}	Retangular	$u(R) = \frac{Resolução}{\sqrt{3}}$	∞
ΔR_{MI}			
ΔIC_{MUC}	<i>T-Student</i>	$u(IC) = \frac{U(IC)}{k}$	295
ΔIC_{AP}			—
ΔIC_{MI}			—

Cabe ressaltar que a incerteza expandida, assim como os graus de liberdade efetivo relativo à incerteza de calibração do anel padrão e à incerteza de calibração do micrômetro interno, foram calculados neste item.

3.4.2. Incerteza associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade

Os modelos matemáticos para cálculo da incerteza dos desvios de circularidade e de cilindridade são idênticos e descritos na Eq.(3.5). Isto se deve ao fato do sistema de medição utilizado para medir ambos os mensurandos ser o mesmo, a MMDF.

$$C_{CY}=C_{Circ}= \Delta s(L_{MMDF}) + \Delta R_{MMDF} + \Delta IC_{MMDF} + \Delta D_{EXC} \quad (3.5)$$

Em que as variáveis de influência são:

- C_{Circ} : desvio de circularidade;
- C_{CY} : desvio de cilindridade;
- $\Delta s(L_{MMDF})$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pela MMDF;
- ΔR_{MMDF} : correção associada à resolução da MMDF;
- ΔIC_{MMDF} : correção associada à incerteza padrão da calibração da MMDF;
- ΔD_{EXC} : correção associada ao desvio de excentricidade da mesa da MMDF;

As distribuições adotadas para as variáveis de influência na avaliação da incerteza dos desvios de cilindridade e circularidade são apresentados na Tab. 3.4, com suas respectivas equações para cálculo da incerteza-padrão e graus de liberdade.

Tabela 3.4 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição do desvio de cilindridade e de circularidade.

Variável	Distribuição	Incerteza-Padrão	Graus de liberdade
$\Delta s(L_{MMDF})$	<i>T-Student</i>	$u(s(L_{MMDF})) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	$n-1$
ΔR_{MMDF}	Retangular	$u(R_{MMDF}) = \frac{\text{Re solução}}{\sqrt{3}}$	∞
ΔIC_{MMDF}	Normal	$u(IC_{MMDF}) = \frac{U(IC_{MMDF})}{k_{MMDF}}$	∞

O valor referente ao desvio de excentricidade da MMDF não está informado em seu certificado de calibração, portanto esta variável não foi considerada no cálculo de incerteza.

3.4.3. Incerteza associada à medição da rugosidade do cilindro

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 ISO TAG 4WG-3 (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. Para tanto, é apresentado abaixo o procedimento de todas as etapas do método para cada parâmetro de rugosidade.

3.4.3.1. Identificação das variáveis de influência

Os parâmetros de amplitude R_a , R_q , R_t , R_{sk} , R_{ku} são definidos de acordo com a norma ABNT 4287 (2002) e são calculados a partir das equações apresentadas no capítulo II. Já os parâmetros funcionais da família R_k , são definidos a partir da curva de *Abbott-Firestone* e descritos pela norma DIN 4776 (1990). A análise do cálculo destes parâmetros foi utilizada como ponto de partida para avaliação da incerteza de medição e identificação das variáveis de influência.

Os parâmetros de amplitude R_a , R_q , R_t , R_{sk} e R_{ku} , podem ser influenciados na medição com contato por: variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro ($s(L_{Rug})$) (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); amplitude da vibração (V) (ABNT 3274, 2008; LYNCEE TEC, 2012); 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.

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

Para avaliação da incerteza na medição sem contato foram consideradas como variáveis de entrada: variabilidade dos valores indicados pelo interferômetro ($s(L_I)$); resolução do interferômetro (R_I); incerteza associada à calibração do interferômetro (IC_I).

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 8.000 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.

3.4.3.2. Definição do modelo matemático

Como definido anteriormente, os parâmetros funcionais e de amplitude são determinados diretamente e indiretamente a partir dos valores das ordenadas de pontos que definem o perfil de rugosidade. Por fim, o valor numérico destas ordenadas depende de um conjunto de fatores ou variáveis de influência definidas anteriormente.

Desta forma, na medição com contato, o modelo matemático para cálculo da incerteza de medição associado a estes parâmetros é dado pela Eq. (3.6).

$$R_{Rug} = \Delta s(L_{Rug}) + \Delta R_{Rug} + \Delta IC_{Rug} + \Delta A_R + \Delta D \quad (3.6)$$

Onde:

- R_{Rug} : parâmetro de rugosidade medido com contato;
- $\Delta s(L_{Rug})$: a correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo rugosímetro;
- ΔR_{Rug} : correção associada à resolução do rugosímetro;
- ΔIC_{Rug} : correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro;

- ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador;
- ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição.

Enquanto o modelo matemático adotado para avaliação da incerteza na medição sem contato é verificado pela Eq. (3.7).

$$R_I = \Delta s(L_I) + \Delta R_I + \Delta IC_I \quad (3.7)$$

Onde:

- R_I : parâmetro de rugosidade medido sem contato;
- $\Delta s(L_I)$: correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo interferômetro;
- ΔR_I : correção associada à resolução do interferômetro;
- ΔIC_I : correção associada à incerteza da calibração do interferômetro.

Logo após, foi adotada uma distribuição de probabilidades seguida da equação da incerteza-padrão para cada variável de influência, conforme mostra a Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Tipo de distribuição, equação da incerteza-padrão e graus de liberdade adotados para cada variável de influência da incerteza associada à medição da rugosidade com rugosímetro e com interferômetro.

Variável	Distribuição	Incerteza-Padrão
$\Delta s(L_{Rug})$	<i>T-Student</i>	$u(s(L)) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$
$\Delta s(L_I)$		
R_{Rug}	Retangular	$u(R) = \frac{Re\ solução}{2 \cdot \sqrt{3}}$
R_I		
ΔIC_{Rug}	<i>T-Student</i>	$u(IC) = \frac{U(IC)}{k}$
ΔIC_I		
ΔA_R	Retangular	$u(A_R) = \frac{0,02 \cdot P}{\sqrt{3}}$
ΔD	Retangular	$u(D) = \frac{D}{\sqrt{3}}$

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, conforme mostrado no cálculo da incerteza-padrão da Tab. 3.5.

O valor da deformação experimentada pela amostra durante a medição, neste trabalho, foi adotado como sendo 20 nm (LEACH, 2001).

3.4.3.3. 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 50.000 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.

3.4.3.4. 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 utilizá-las para aplicação do MC. Com isto, torna-se necessário utilizar “funções” disponíveis no Excel (Tab. 3.6) para gerar os vetores com os valores correspondentes a cada variável de entrada. Portanto as distribuições de probabilidade consideradas foram as adotadas em cada caso.

Tabela 3.6 – 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. (3.8) para efetuar esta perturbação.

$$valor = (ALEATORIO() \cdot u(x_i)) \cdot 2 - u(x_i) \quad (3.8)$$

3.4.3.5. 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.

3.4.3.6. 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.

3.5. 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. 3.11), cuja potência do motor principal é de 12,5 CV, com rotação máxima de 7.500 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*.

Embora o processo de produção fabril seja realizado em uma máquina especial multifuso, a utilização da máquina fresadora reproduz satisfatoriamente as condições reais de operação. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão sintética com concentração de 95%, disponível na máquina.



Figura 3.11 – Fresadora CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (ROMI, 2014).

Este processo foi efetuado em 14 blocos, visto que o bloco 15 foi cortado ao meio inicialmente para realização da medição sem contato da rugosidade.

Os parâmetros de corte são apresentados na Tab. 3.7:

Tabela 3.7 – Parâmetros de corte para o brunimento flexível.

Velocidade de Corte (m/min)	54,9
Profundidade de Corte (mm)	0,0005
Avanço (mm/min)	2800

3.5.1. Sistema de fixação e alinhamento do cilindro

Inicialmente, os ensaios de usinagem se tornavam limitados devido à geometria complexa do bloco, dificultando a sua fixação na máquina. Para este fim foi desenvolvido e fabricado um dispositivo. Para construção do mesmo foi utilizado um tarugo cilíndrico de ferro fundido, cujo projeto é apresentado na Fig. 3.12, com dimensões de 55 mm de largura, 40 mm de altura e 90 mm de comprimento. A usinagem foi realizada numa máquina fresadora CNC com operações de furação e fresamento (Fig. 3.13).

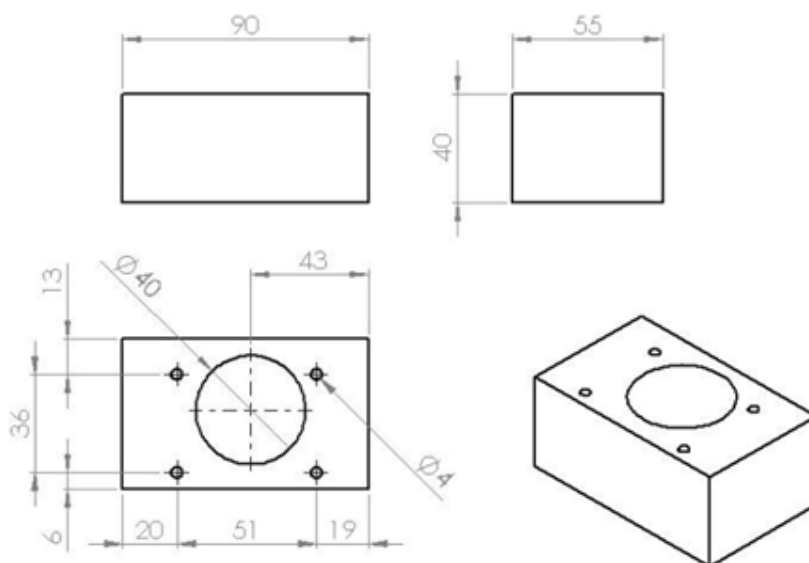


Figura 3.12 – Projeto para fabricação do dispositivo de fixação do bloco do compressor hermético em uma fresadora CNC.



Figura 3.13 – Operação de fresamento em um tarugo cilíndrico utilizando uma máquina fresadora CNC, para fabricação do dispositivo de fixação.

A geometria final obtida para o dispositivo foi retangular, com três furos em sua superfície (Fig.3.14), um no centro de diâmetro 40 mm, e dois nas extremidades de diâmetro 4 mm. O primeiro tem por objetivo escoar o fluido de corte enquanto os dois últimos foram utilizados para colocar dois pinos que se encaixam ao bloco.

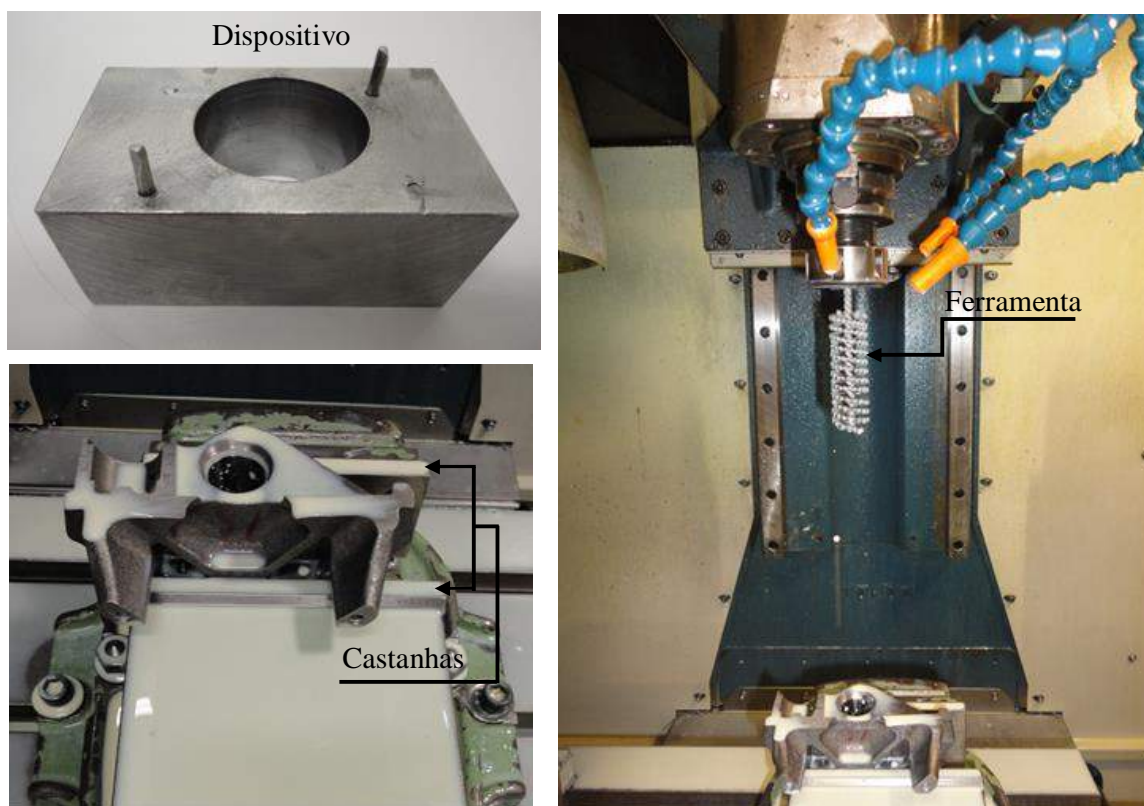


Figura 3.14 – Dispositivo fabricado para fixação do bloco de um compressor hermético em uma fresadora CNC.

O alinhamento foi realizado utilizando uma broca, tocando-a em um dos lados do cilindro e retornando-a a posição referente ao centro do cilindro (metade de seu diâmetro). Este procedimento foi viável visto que a ferramenta é auto-centrante.

3.5.2. Ferramenta de corte

Para realização do brunimento flexível foi utilizada um brunidor flexível, (Fig. 3.15) que possui as seguintes especificações (Tab. 3.8):

Tabela 3.8 – Especificações da ferramenta brunidora flexível (VERTEC, 2008).

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



Figura 3.15 – Brunidor flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria 800 mesh.

A ferramenta brunidor foi fixada por um mandril tipo chave. Foram efetuados dois golpes no cilindro, um no sentido horário e o outro no anti-horário.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, divididos em cinco etapas: (1) medição do diâmetro do cilindro com MMC; (2) medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno; (3) desvio de cilindricidade do cilindro; (4) desvio de circularidade do cilindro; (5) rugosidade do cilindro.

4.1. Medição do diâmetro do cilindro com MMC

São apresentados na Tab. 4.1 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência associados à medição do diâmetro com MMC, dos cilindros dos blocos 7 e 13 usinados pelo brunimento convencional.

Tabela 4.1 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros dos blocos 7 e 13 usinados pelo brunimento convencional (BC).

Blocos	BC			
	$\bar{x}(\text{mm})$	$s \text{ (mm)}$	$U \text{ (mm)}$	k
7	22,507	0,001	0,002	1,97
13	22,507	0,001	0,002	1,97

De acordo com a Tab. 4.1, a média, o desvio-padrão, a incerteza expandida e o fator de abrangência associados ao diâmetro dos cilindros usinados pelo brunimento convencional mostram-se similares e iguais a 22,507 mm, 0,001 mm, 0,002 mm e 1,97, respectivamente.

Conforme descrito no capítulo III, são apresentadas aqui somente os resultados das medições referentes aos blocos 7 e 13, devido a um problema que surgiu durante a utilização da MMC, não sendo possível medir o diâmetro dos demais cilindros. Depois de realizado o brunimento flexível, o problema foi solucionado e efetuaram-se as medições do diâmetro dos cilindros usinados por este processo. Cabe ressaltar, que nesta etapa, o bloco 9 selecionado para avaliação da rugosidade sem contato, já havia sido cortado e portanto, não foi medido.

A seguir são apresentados na Tab. 4.2, os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência associados à medição do diâmetro com MMC, dos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.2 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

Blocos	BF			
	$\bar{x}(\text{mm})$	$s \text{ (mm)}$	$U \text{ (mm)}$	k
1	22,512	0,001	0,002	1,99
2	22,510	0,001	0,002	1,99
3	22,509	0,001	0,002	1,99
4	22,510	0,001	0,002	1,97
5	22,511	0,001	0,002	1,97
6	22,516	0,002	0,003	2,09
7	22,517	0,001	0,002	1,97
8	22,518	0,002	0,003	2,07
10	22,515	0,001	0,002	2,02
11	22,518	0,001	0,002	1,97
12	22,514	0,001	0,002	2,00
13	22,515	0,002	0,002	2,02
14	22,512	0,000	0,002	1,97

Para os diâmetros medidos após o brunimento convencional mais o flexível, verifica-se na Tab. 4.2 que a média apresentou valores entre 22,509 mm e 22,518 mm, enquanto que o desvio-padrão exibiu valores entre 0 (zero) e 0,002 mm. Por fim, verificaram-se para a incerteza expandida valores entre 0,002 mm e 0,003 mm.

Observa-se para os blocos 7 e 13, um aumento do diâmetro de 10 μm e de 8 μm , respectivamente, após o brunimento convencional mais o flexível.

Com relação à incerteza de medição, verifica-se nas Tabs. 4.1 e 4.2, que os valores obtidos são similares, indicando que não houve melhoria na qualidade destes resultados após o brunimento convencional mais o flexível.

A Tabela 4.3 apresenta os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição do diâmetro medido com MMC, referente ao cilindro do bloco 1 usinado pelo brunimento convencional mais o flexível. Cabe ressaltar que foram apresentados três Algarismos a mais do que aqueles exigidos pela resolução em todos os resultados dos cálculos intermediários, a fim de minimizar os erros devido ao arredondamento. Esta prática foi adotada durante a avaliação da incerteza de medição de todos os mensurandos.

Tabela 4.3 - Avaliação da incerteza para o diâmetro do cilindro do bloco 1, medido com MMC, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (mm)	TI	DP	GL	CS (mm)	Incerteza padrão
$\Delta s(L_{MMC})$	0,001140	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,000510 mm
ΔR_{MMC}	0,001	B	Retangular	∞	1	0,000289 mm
$\Delta IC_{MMC}(x, y, z)$	0,000705	B	Normal	∞	1	0,000705 mm
ΔE_{MMC}	0,0012	B	Retangular	∞	1	0,000693 mm
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,001149 mm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						90
Fator de abrangência (k)						1,99
Incerteza expandida (U)						0,002283 mm

Na Tabela 4.3, constata-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi à incerteza associada à calibração da máquina, com 37,6% de contribuição, seguido da incerteza associada ao erro de apalpamento, com 36,4% de contribuição.

Com base nestes resultados, pode-se afirmar que o brunimento flexível aplicado após o convencional proporcionou uma variação dimensional relativamente pequena dos cilindros

dos blocos 7 e 13, indicando que durante esta operação foi removido uma quantidade muito pequena de material. Com o intuito de complementar esta avaliação, são apresentados a seguir os resultados obtidos na medição do diâmetro com micrômetro interno.

4.2. Medição do diâmetro do cilindro com micrômetro interno

4.2.1. Calibração do anel padrão

A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos para as 10 medições do diâmetro (D) do anel padrão, bem como a média aritmética e o desvio-padrão para 68,27% de confiabilidade.

Tabela 4.4 – Valores das indicações, média aritmética (\bar{x}) e desvio-padrão do diâmetro do anel padrão, medido com a MUC.

D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)
20,0200	20,0224	20,0220	20,0222	20,0232	20,0206	20,0228	20,0230	20,0214
						D10 (mm)	\bar{x} (mm)	s (mm)
						20,0224	20,0220	0,00104

O valor convencional do diâmetro do anel padrão é de 20,0220 mm.

A incerteza expandida associada à calibração do anel padrão é declarada como sendo 0,0007 mm, baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,20$, para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.O certificado de calibração do anel padrão foi elaborado e está no APÊNDICE I.

A variável de influência que mais contribuiu para a incerteza final foi à incerteza associada à variabilidade das leituras com 86,7% de contribuição, seguida da incerteza de calibração da máquina com 10,4%.

4.2.2. Calibração do micrômetro

A Tabela 4.5 mostra os valores obtidos para as 10 medições do diâmetro (D) do anel padrão por meio do micrômetro interno, bem como a média aritmética e o desvio-padrão para 68,27% de confiabilidade.

Tabela 4.5 – Valores das indicações, média aritmética (\bar{x}) e desvio-padrão do diâmetro do anel padrão, medido com micrômetro para internos.

D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)	D10 (mm)
20,035	20,030	20,035	20,035	20,035	20,035	20,035	20,035	20,030	20,035
								\bar{x} (mm)	s (mm)
								20,034	0,002

Considerando que o valor convencional do diâmetro é de 20,0220 mm, estimou-se que o erro sistemático do micrômetro é de 0,012 mm. Desta forma, o micrômetro calibrado apresenta uma tendência de fornecer valores de diâmetro maiores que o real.

Com relação à precisão, observa-se que a mesma é de 0,002 mm em condições de repetibilidade, sendo considerada adequada.

A incerteza expandida associada à calibração do micrômetro interno é declarada como sendo 0,006 mm, para um fator de abrangência $k = 1,96$, distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. O certificado de calibração do micrômetro foi elaborado e está no APÊNDICE II.

A variável de influência que mais contribuiu para a incerteza final foi a resolução do micrômetro com 93,8% de contribuição, seguida da variabilidade das leituras com 4,9%.

São apresentados na Tab. 4.6 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência associados à medição do diâmetro com micrômetro interno, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Conforme mostra a Tab. 4.6, as médias referentes ao diâmetro dos cilindros usinados pelo brunimento convencional, assumem valores entre 22,509 mm e 22,514 mm. Ainda, verificam-se valores de desvio-padrão entre 0,004 mm e 0,006 mm. Após o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios de diâmetro encontram-se no intervalo de 22,509 mm a 22,513 mm, enquanto que o desvio-padrão exibe valores entre 0,003 mm e 0,005 mm. Assim, verifica-se uma maior precisão dos valores obtidos quando efetuado as duas operações, quando comparado aos valores obtidos somente pelo brunimento convencional.

A fim de auxiliar na interpretação dos resultados, são apresentados na Fig. 4.1 os valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente aos

cilindros usinados pelos processos de brunimento convencional e convencional mais o flexível com barra de erros associada ao desvio-padrão (68,27%).

Tabela 4.6 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência referentes aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Blocos	BC				BF			
	\bar{x} (mm)	s (mm)	U (mm)	k	\bar{x} (mm)	s (mm)	U (mm)	k
1	22,510	0,006	0,010	2,01	22,511	0,004	0,009	1,98
2	22,511	0,004	0,009	1,98	22,513	0,004	0,009	1,98
3	22,512	0,005	0,009	1,99	22,511	0,004	0,009	1,98
4	22,511	0,004	0,009	1,98	22,513	0,004	0,009	1,98
5	22,512	0,005	0,009	1,99	22,513	0,004	0,009	1,98
6	22,512	0,005	0,009	1,99	22,511	0,004	0,009	1,98
7	22,514	0,004	0,009	1,98	22,511	0,004	0,009	1,98
8	22,512	0,005	0,009	1,99	22,510	0,003	0,009	1,98
9	22,509	0,006	0,010	2,01	22,513	0,004	0,009	1,98
10	22,512	0,005	0,009	1,99	22,509	0,003	0,008	1,96
11	22,512	0,005	0,009	1,99	22,510	0,003	0,008	1,96
12	22,512	0,005	0,009	1,99	22,512	0,004	0,009	1,97
13	22,510	0,004	0,009	1,98	22,511	0,004	0,009	1,98
14	22,512	0,005	0,009	1,99	22,512	0,005	0,009	1,99

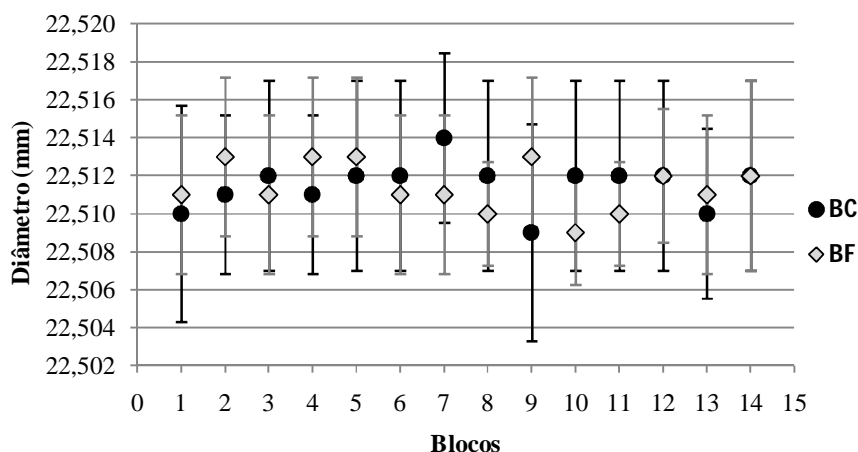


Figura 4.1 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associada ao desvio-padrão.

Conforme mostra a Fig. 4.1, os valores de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, apresentaram tanto uma redução (blocos 3, 6, 7, 8, 10 e 11) quanto um aumento (blocos 1, 2, 4, 5, 9 e 14) após o brunimento convencional mais o flexível. Este fato pode ser justificado devido à quantidade de material removida por este processo ser muito pequena, tornando-se imperceptível pela resolução do micrômetro interno utilizado. Portanto, a resolução do instrumento não foi capaz de detectar a variação dimensional dos cilindros de um processo para outro.

Na Tabela 4.7 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição do diâmetro medido com micrômetro interno, referente ao cilindro do bloco 1 usinado pelo brunimento convencional. Verifica-se nesta tabela que a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a calibração do micrômetro com 37,4% e em seguida a resolução do instrumento com 35,1%.

Tabela 4.7 - Avaliação da incerteza para o diâmetro do cilindro do bloco 1, usinado pelo brunimento convencional e medido com micrômetro interno, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (mm)	TI	DP	GL	CS (mm)	Incerteza padrão
$\Delta s(L_{MI})$	0,006	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,002550 mm
ΔR_{MI}	0,005	B	Retangular	∞	1	0,002887 mm
ΔIC_{MI}	0,006	B	<i>T-Student</i>	∞	1	0,002980 mm
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,004870mm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						54
Fator de abrangência (k)						2,01
Incerteza expandida (U)						0,009767 mm

De acordo com a Tab. 4.6, a incerteza expandida apresentou valores iguais a 0,009 mm e 0,010 mm para o brunimento convencional e valores iguais a 0,008 mm e 0,009 mm para o brunimento convencional mais o flexível.

São apresentados na Fig. 4.2 os valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno após ambas as operações com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

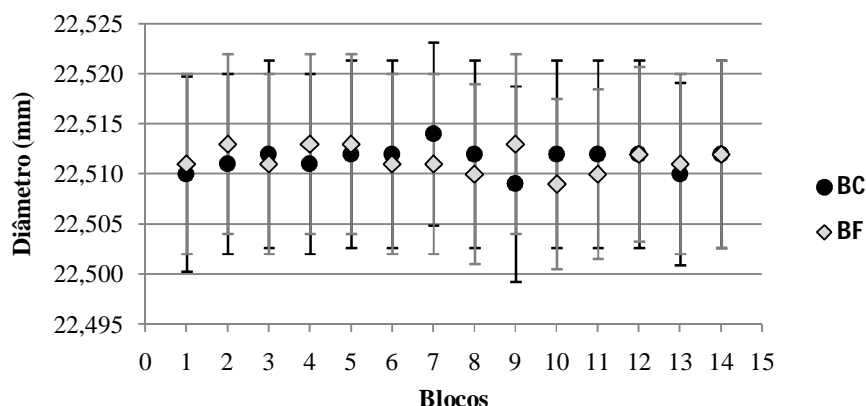


Figura 4.2 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, referente aos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associada à incerteza de medição.

Observa-se na Fig. 4.2 que as faixas de valores associadas ao diâmetro dos cilindros usinados pelos dois processos, encontram-se parcialmente superpostas, indicando que os valores são similares. Como verificado anteriormente, a resolução afetou diretamente nos resultados obtidos pelo micrômetro interno.

São mostrados na Fig. 4.3 os valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno, após o brunimento convencional e os valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, após o brunimento convencional mais o flexível com barras de erros associada à incerteza expandida.

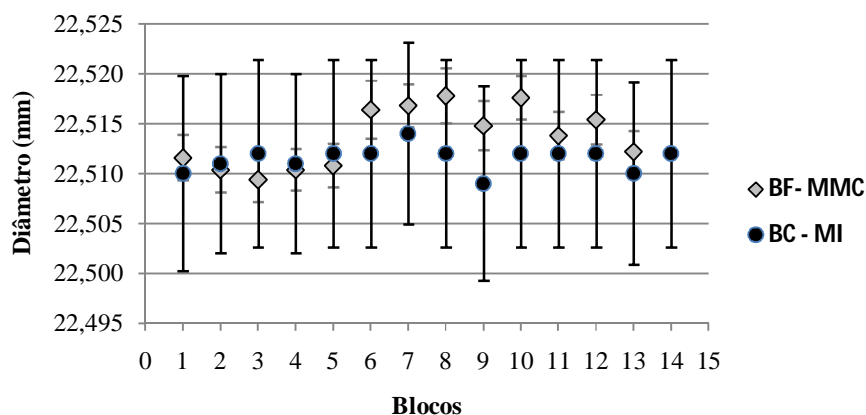


Fig. 4.3 – Valores médios de diâmetro obtidos na medição com micrômetro interno (MI), referente ao brunimento convencional (BC) e, na medição com MMC, referente ao brunimento convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associada à incerteza expandida.

Verifica-se que os valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC relativos ao brunimento convencional mais o flexível, estão dentro do intervalo de incerteza associada à medição do diâmetro com micrômetro interno, realizada após o brunimento convencional. Portanto há uma incerteza de 95% de probabilidade que os valores médios referentes ao brunimento convencional possam ser iguais ou menores que os valores médios referentes ao brunimento convencional mais o flexível, justificando a redução do diâmetro observada para os cilindros dos blocos 2, 3, 4 e 5 após este processo. Ainda, constata-se uma maior confiabilidade dos valores médios de diâmetro obtidos na medição com MMC, uma vez que a incerteza expandida para este processo de medição é menor que a incerteza expandida na medição com micrômetro interno, pois a resolução da MMC é 5 vezes melhor.

Conclui-se que a medição realizada através do micrômetro interno, não foi capaz de detectar a variação dimensional do cilindro após o brunimento convencional mais o flexível, devido à baixa resolução deste equipamento. No entanto, comparando-se os valores obtidos pelo micrômetro com os valores obtidos pela MMC, que possui resolução superior, é possível afirmar que a maioria dos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível sofreu um aumento relativamente pequeno do diâmetro, assim como observado para os dois blocos medidos antes e após este processo, na MMC. Portanto, o brunimento flexível remove pequenas quantidades de material, em que a variação dimensional pode ser considerada desprezível, pois provavelmente não influenciara no adequado funcionamento do par cilindro-pistão.

4.3. Desvio de cilindridade do cilindro

São apresentados na Tab. 4.8 os valores médios, desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95%) associadas aos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Conforme mostra a Tab. 4.8, os valores médios após o brunimento convencional encontram-se no intervalo de 4,53 μm a 9,90 μm , sendo a maior média atribuída ao bloco 7 e a menor média ao bloco 8. Após o brunimento convencional mais o flexível, o desvio de cilindridade assume valores entre 3,41 μm a 9,93 μm , observando-se o maior e o menor valor para os blocos 1 e 13, respectivamente. Estes resultados são melhor evidenciados na

Fig. 4.4, que mostra a distribuição dos valores médios do desvio de cilindridade dos cilindros usinados por ambos os processos, com barra de erros associada ao desvio-padrão.

Tabela 4.8 – Valores médios, desvios-padrão e incertezas expandidas dos desvios de cilindridade em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	8,85	3,19	3,96	9,93	2,68	3,33
2	6,35	2,00	2,48	7,77	1,82	2,26
3	9,58	3,21	3,99	7,54	1,59	1,97
4	6,35	1,41	1,75	6,65	1,93	2,40
5	7,58	2,07	2,57	6,88	2,23	2,77
6	5,59	1,11	1,38	7,44	1,51	1,87
7	9,90	1,19	1,48	6,83	3,79	4,71
8	4,53	1,22	1,51	7,52	2,01	2,50
9	8,16	1,72	2,14	8,38	1,89	2,35
10	5,97	1,39	1,73	9,35	1,83	2,27
11	6,66	0,79	0,98	7,85	1,52	1,89
12	5,36	0,88	1,09	7,23	1,88	2,33
13	4,70	0,72	0,89	3,41	0,68	0,84
14	5,08	1,52	1,89	5,45	0,92	1,14

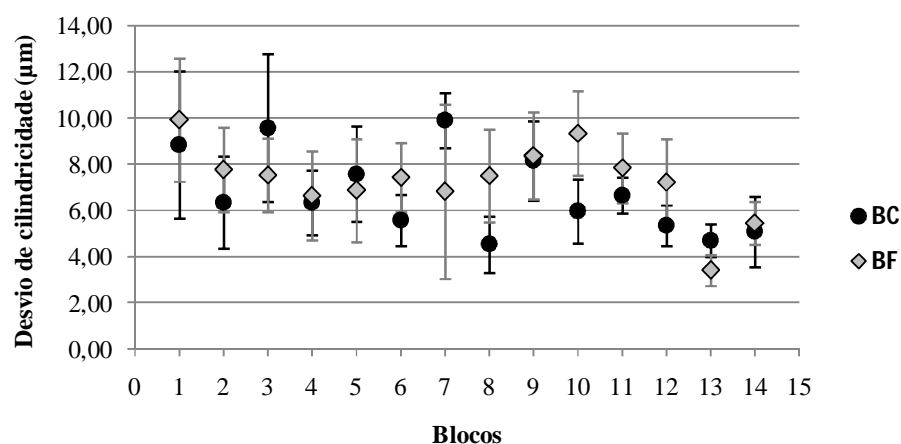


Figura 4.4 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associada ao desvio-padrão.

Constataram-se altos valores de desvio-padrão em todos os casos, que pode ser atribuído à fonte de erro de medição, da centralização da peça, em razão da distribuição heterogênea da massa do bloco.

A fim de verificar a diferença percentual entre os valores do desvio de cilindridade após ambas as operações de brunimento, são apresentados na Fig. 4.5 os valores médios dos desvios de cilindridade com a respectiva diferença percentual de um processo para outro.

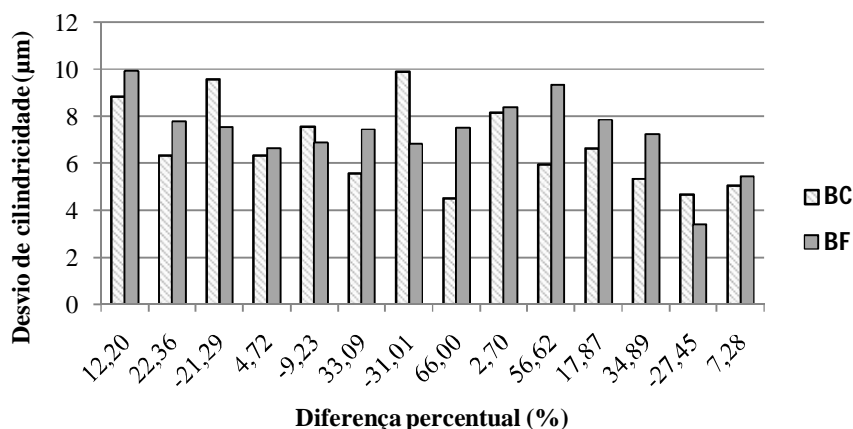


Figura 4.5 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com a diferença percentual de um processo para o outro.

Comparando-se os valores de desvio de cilindridade obtidos por ambos os processos, não foi possível observar uma tendência definida. Verifica-se na Fig. 4.5, que os blocos 1, 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12 e 14 exibem um aumento do desvio de cilindridade após o brunimento convencional mais o flexível, com valor percentual máximo de 66,0% atribuído ao cilindro do bloco 8, enquanto que os blocos 3, 5, 7 e 13 mostraram uma redução, destacando-se o cilindro do bloco 7 com a maior redução de 31,0% do desvio de cilindridade.

Na Figura 4.6a é exibido o gráfico do desvio de cilindridade do cilindro do bloco 7, usinado pelo brunimento convencional, em que é possível verificar um formato cônico, possivelmente proporcionado pelo desbalanceamento da peça durante o processo de medição. Já na Fig. 4.6b, observa-se o gráfico deste desvio para o cilindro do bloco 7 usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, exibindo um formato aproximadamente cilíndrico. Esta tendência foi observada para todos os cilindros que apresentaram uma redução do desvio de cilindridade, enquanto que os demais se mostraram cônicos antes e após o brunimento flexível, condizente com o aumento dos valores deste desvio.

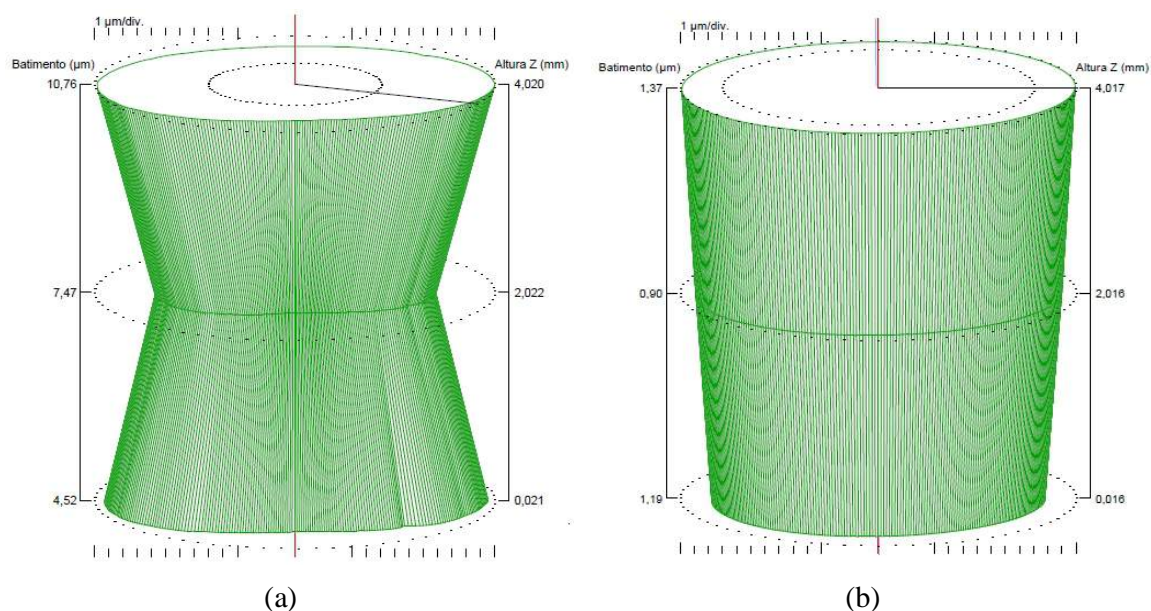


Figura 4.6 – Gráficos dos desvios de cilindricidade obtido para o cilindro do bloco 7 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.

Na Tabela 4.9 são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição do desvio de cilindricidade do cilindro do bloco 1, usinado pelo brunimento convencional.

Tabela 4.9 - Avaliação da incerteza para o desvio de cilindricidade do cilindro 1 usinado pelo brunimento convencional, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) desvio-padrão; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (μm)	TI	DP	GL	CS (μm)	Incerteza padrão
$\Delta s (L_{CY})$	3,19	A	<i>T-Student</i>	4	1	1,424403 μm
ΔR_{MMDF}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,002887 μm
ΔIC_{MMDF}	0,005	B	Normal	∞	1	0,005000 μm
Incerteza padrão combinada (u_c)						1,424415 μm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4,00
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U)						3,954834 μm

Segundo a Tab. 4.8, a incerteza expandida após o brunimento convencional assume valores entre 0,89 μm e 3,99 μm, sendo o maior valor atribuído ao bloco 3 e o menor ao

bloco 13. Por sua vez, após o brunimento convencional mais o flexível, os valores da incerteza expandida encontram-se no intervalo de 0,84 μm a 4,71 μm , observando-se o maior e o menor valor para os blocos 7 e 13 respectivamente.

De acordo com a Tab. 4.9, a variável que mais contribuiu para o cálculo da incerteza foi a variabilidade das leituras com 99,9% de contribuição.

Na Figura 4.7 são exibidos os valores médios dos desvios de cilindridade após ambos os processos de brunimento com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

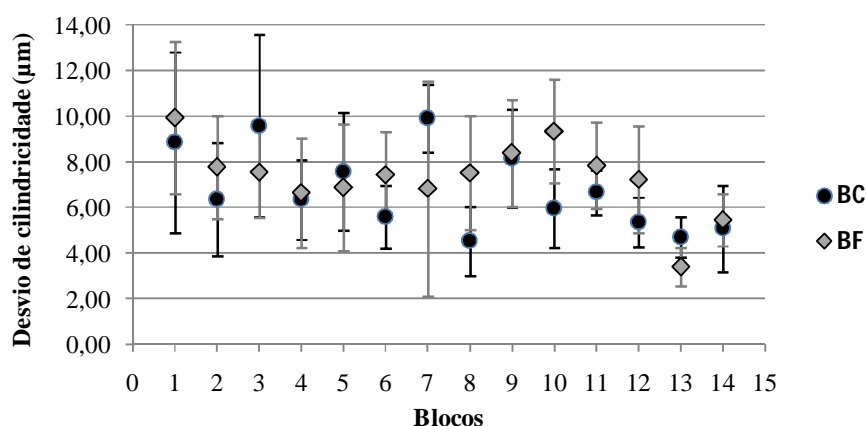


Figura 4.7 – Valores médios dos desvios de cilindridade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

Verifica-se através da Fig. 4.7, que o bloco 3 apresentou o maior valor de incerteza expandida para o brunimento convencional de 3,99 μm e o bloco 7 para o brunimento convencional mais o flexível de 4,71 μm .

Após a análise dos resultados obtidos nesta etapa, conclui-se que o brunimento flexível efetuado após o convencional, gerou um aumento do desvio de cilindridade para a maioria dos cilindros (10 blocos). Logo, este processo não se mostrou eficaz na redução deste desvio.

4.4. Desvio de circularidade do cilindro

A avaliação do desvio de circularidade foi realizada em 3 planos. Estes planos pré-definidos na metodologia foram medidos paralelamente com o desvio de cilindridade e analisados em separado.

4.4.1. Desvio de circularidade no plano 1 do cilindro

São apresentados na Tab. 4.10 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência associados aos desvios de circularidade no plano 1 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.10 – Valores obtidos para média, desvio-padrão, incerteza expandida e fator de abrangência do desvio de circularidade para o plano1, em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC				BF			
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k
1	3,56	0,07	0,09	2,78	0,90	0,01	0,01	1,99
2	2,71	0,03	0,03	2,45	0,60	0,01	0,01	1,97
3	3,59	0,02	0,03	2,36	0,77	0,00	0,01	1,97
4	4,17	0,01	0,02	2,12	0,88	0,01	0,01	2,01
5	2,56	0,01	0,02	2,14	0,54	0,01	0,01	2,01
6	3,64	0,01	0,02	2,18	0,77	0,00	0,01	1,97
7	4,38	0,03	0,04	2,57	0,93	0,00	0,01	1,97
8	3,24	0,02	0,03	2,36	0,79	0,00	0,01	1,97
9	2,62	0,03	0,04	2,57	0,57	0,01	0,01	2,01
10	3,02	0,01	0,01	2,01	0,72	0,01	0,01	1,97
11	5,11	0,02	0,02	2,26	1,13	0,01	0,01	1,97
12	2,18	0,01	0,02	2,13	0,45	0,00	0,01	1,96
13	2,23	0,06	0,07	2,78	0,53	0,00	0,01	1,97
14	2,92	0,03	0,04	2,57	0,78	0,00	0,01	1,97

Conforme mostra a Tab. 4.10, os valores médios do desvio de circularidade dos cilindros usinados pelo brunimento convencional estão no intervalo de 2,18 μm a 5,11 μm , sendo a maior média atribuída ao bloco 11 e a menor média ao bloco 12. Enquanto que para o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios variam entre 0,45 μm e 1,13 μm , observando-se o maior e o menor valor para os blocos 11 e 12, respectivamente. Ainda, a média total dos desvios de circularidade dos cilindros após este processo foi de 0,74 μm .

De acordo com a Tab. 4.10, o valor mínimo e o valor máximo para o desvio-padrão foi de 0,01 μm e de 0,07 μm , respectivamente, após o brunimento convencional, enquanto que após o brunimento convencional mais o flexível, foram observados valores de desvio-padrão iguais a 0 (zero) e 0,01 μm , comprovando a excelente precisão dos valores obtidos.

Na Figura 4.8 são mostrados os valores médios dos desvios de circularidade no plano 1 dos cilindros usinados por ambos os processos.

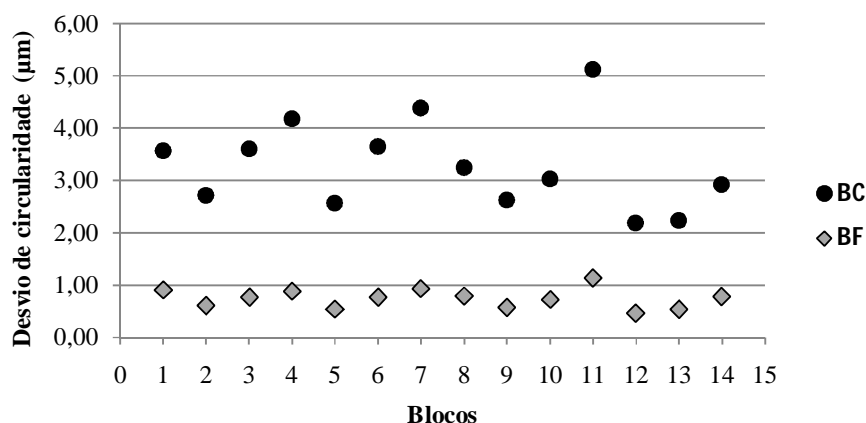


Figura 4.8– Valores médios dos desvios de circularidade no plano1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Observa-se na Fig. 4.8, que os cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível apresentaram valores de desvio de circularidade similares e menores. Com o intuito de quantificar esta redução, são apresentados na Fig. 4.9 os valores médios dos desvios de circularidade dos cilindros após ambas as operações com a diferença percentual de um processo para o outro.

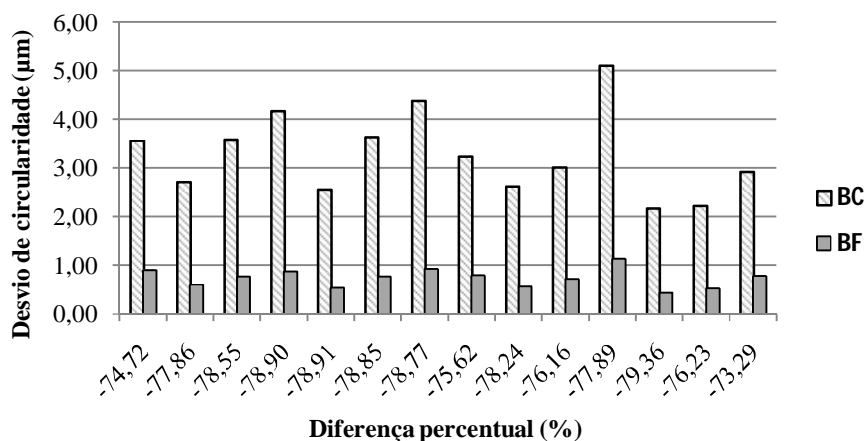


Figura 4.9 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

A Figura 4.9 evidencia a redução significativa dos valores dos desvios de circularidade após o brunimento convencional mais o flexível, com redução média de 77,4%. Os valores mínimos e máximos verificados para a diferença percentual foram de 73,3% e 79,4% para os

cilindros dos blocos 14 e 12, respectivamente. Ainda, verificou-se esta melhora por meio dos gráficos de circularidade do cilindro do bloco 12, após o brunimento convencional (Fig.4.10a) e após o brunimento convencional mais o flexível (Fig.4.10b).

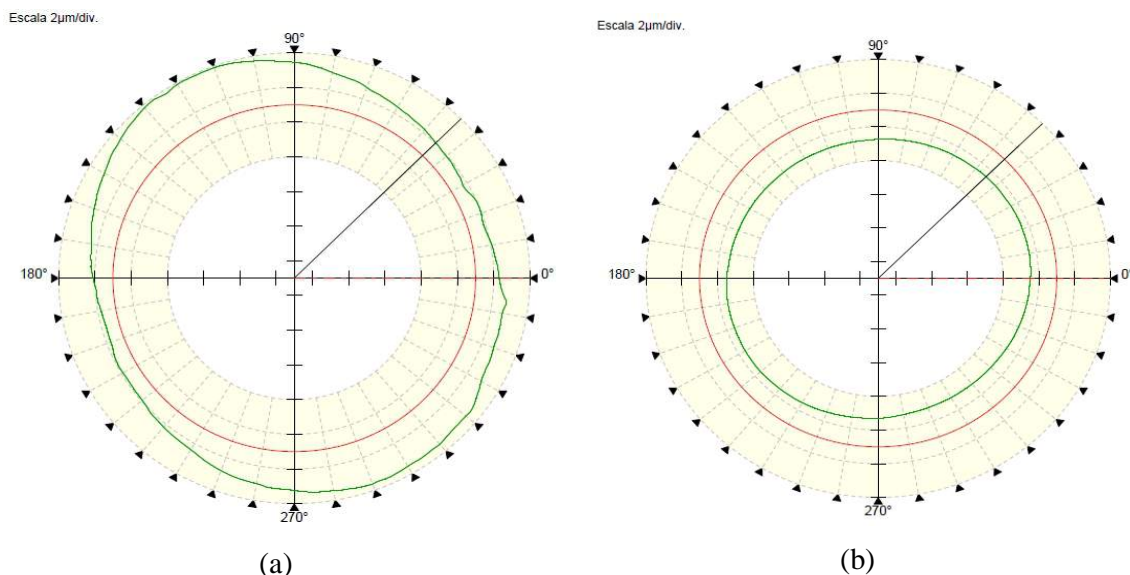


Figura 4.10 – Gráficos do desvio de circularidade obtido para o cilindro do bloco 12 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.

De acordo com a Fig. 4.10a, o gráfico obtido para o cilindro do bloco 12 apresentou uma forma geométrica oval com irregularidades após o brunimento convencional. Já na Figura 4.10b, referente ao brunimento convencional mais o flexível, este mesmo cilindro apresentou forma geométrica próxima a um círculo e sem irregularidades. Portanto, constata-se que a aplicação do brunimento flexível após o brunimento convencional reduziu os valores de circularidade no plano1 do cilindro.

A análise acima é válida para todos os blocos, uma vez que gráficos similares aos mostrados na Fig. 4.10 foram obtidos para todos os cilindros antes e após o brunimento flexível.

São apresentados na Tab. 4.11 os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição do desvio de circularidade no plano 1 do cilindro do bloco 1, usinado pelo brunimento convencional.

Tabela 4.11 - Avaliação da incerteza associado ao desvio de circularidade no plano 1do cilindro 1, usinado pelo brunimento convencional, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (μm)	TI	DP	GL	CS (μm)	Incerteza padrão
$\Delta s(L_{Circ})$	0,07	A	<i>T-Student</i>	4	1	0,029933 μm
ΔR_{MMDF}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,002887 μm
ΔIC_{MMDF}	0,005	B	Normal	∞	1	0,005000 μm
Incerteza padrão combinada (u_c)						0,030485 μm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4,00
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U)						0,084640 μm

De acordo com a Tab. 4.10, a incerteza expandida após o brunimento convencional apresentou valores no intervalo de 0,01 μm a 0,09 μm , exibindo valor mínimo e máximo para os blocos 10 e 1 respectivamente. Na Tabela 4.11 constata-se que a variabilidade das leituras foi a variável que mais contribui para a incerteza final com 96,4% de contribuição. Já após o brunimento convencional mais o flexível, obtiveram-se valores de incerteza expandida de 0,01 μm para todos os mensurandos (Tab. 4.10), destacando a incerteza de calibração da MMDF como variável de maior influência com 57,7% de contribuição (Tab. 4.11).

4.4.2. Desvio de circularidade no plano 2 do cilindro

São apresentados na Tab. 4.12 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 2 em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.12 – Valores médios, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 2 em cilindros de blocos de compressores herméticos usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC				BF			
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k
1	3,15	0,10	0,12	2,78	0,79	0,00	0,01	1,96
2	2,46	0,01	0,01	2,01	0,56	0,01	0,01	2,02
3	3,24	0,05	0,06	2,78	0,73	0,00	0,01	1,97
4	3,78	0,01	0,01	2,02	0,80	0,01	0,01	1,99
5	2,36	0,01	0,01	2,02	0,50	0,01	0,01	1,97
6	3,32	0,03	0,04	2,57	0,69	0,01	0,01	1,99
7	3,79	0,02	0,02	2,20	0,80	0,00	0,01	1,97
8	2,78	0,02	0,02	2,26	0,72	0,01	0,01	1,97
9	2,20	0,06	0,07	2,78	0,54	0,01	0,01	2,01
10	2,66	0,01	0,02	2,11	0,66	0,00	0,01	1,97
11	4,56	0,05	0,06	2,78	1,01	0,00	0,01	1,97
12	1,93	0,01	0,01	2,01	0,44	0,01	0,01	2,01
13	2,11	0,03	0,04	2,57	0,46	0,01	0,01	1,97
14	2,58	0,02	0,03	2,45	0,73	0,00	0,01	1,97

Conforme mostra a Tab. 4.12, os valores médios após o brunimento convencional estão no intervalo de 1,93 μm a 4,56 μm , sendo a maior média atribuída ao bloco 11 e a menor média ao bloco 12. O desvio-padrão exibiu valores dentro do intervalo de 0,01 μm a 0,10 μm , sendo o menor valor associado aos cilindros dos blocos 2, 4, 5, 10, 12 e o maior valor para o cilindro do bloco 1.

Após o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios de circularidade encontraram-se no intervalo de 0,44 μm a 1,01 μm , observando-se o maior e o menor valor para os blocos 11 e 12, respectivamente. A média total do desvio de circularidade no plano 2 dos cilindros foi de 0,67 μm . O desvio-padrão obteve valores entre 0 (zero) e 0,01 μm , evidenciando a excelente precisão dos valores obtidos.

A incerteza expandida após o brunimento convencional assume valores dentro do intervalo de 0,01 μm a 0,12 μm , sendo atribuído o menor valor aos cilindros dos blocos 2, 4, 5 e 12 e o maior valor ao cilindro do bloco 1. Durante a avaliação da incerteza, constatou-se que a variabilidade das leituras foi a variável que mais contribui para a incerteza final com 98,3% de contribuição. Já após o brunimento convencional mais o flexível os valores de incerteza

apresentaram-se iguais a $0,01 \mu\text{m}$, destacando a incerteza de calibração da MMDF como variável de maior influência com 75,0% de contribuição.

Na Figura 4.11 é apresentado a distribuição dos valores médios dos desvios de circularidade no plano 2 dos cilindros usinados por ambos os processos de brunimento.

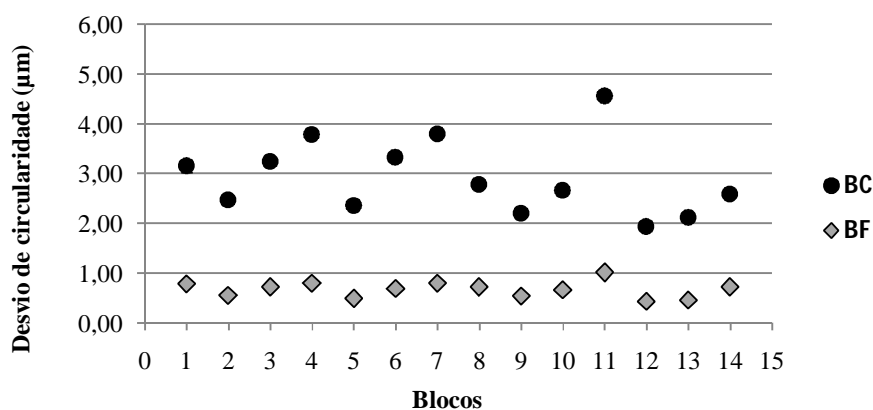


Figura 4.11 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 2 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Conforme mostra a Fig. 4.11, o brunimento convencional mais o flexível proporcionou uma redução significativa do desvio de circularidade no plano 2 do cilindro e valores aproximados. Com o objetivo de verificar esta redução, são apresentados na Fig. 4.12 os valores médios dos desvios de circularidade dos cilindros após ambas as operações com a diferença percentual de um processo para o outro.

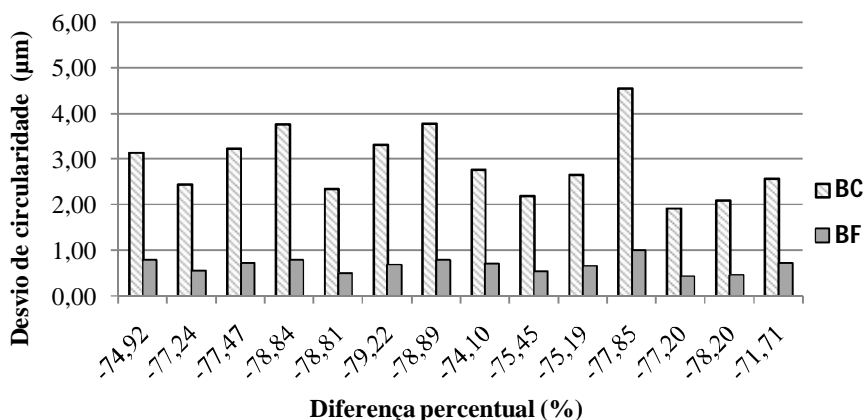


Figura 4.12 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 2 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conforme mostra a Fig. 4.12, os valores mínimos e máximos verificados para a diferença percentual foram de 71,7% e 79,2%, para os cilindros dos blocos 14 e 6, respectivamente. A diferença média percentual total do desvio de circularidade no plano 2 dos cilindros de um processo para o outro foi de 76,8%.

A seguir são mostrados os gráficos de circularidade do cilindro do bloco 6, após o brunimento convencional (Fig.4.13a) e após o brunimento convencional mais o flexível (Fig.4.13b).

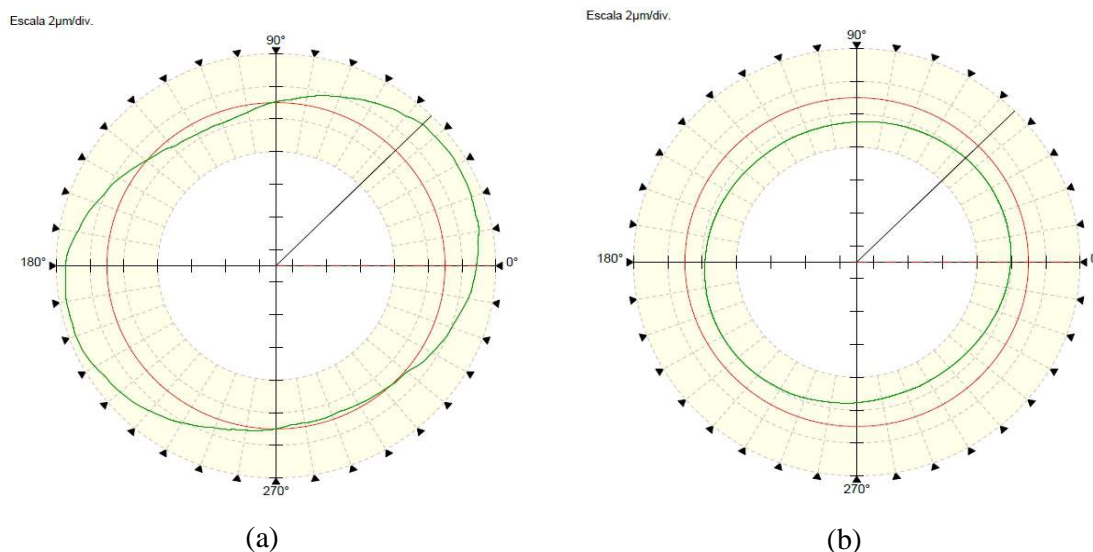


Figura 4.13 – Gráficos dos desvios de circularidade obtido para o cilindro do bloco 6 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.

Verifica-se que os gráficos de circularidade das Figs. 4.13a e 4.13b, são similares aos gráficos obtidos no plano 1.

4.4.3. Desvio de circularidade no plano 3 do cilindro

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95%) e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.13 – Valores médios, desvios-padrão, incertezas expandidas e fatores de abrangência dos desvios de circularidade no plano 3 em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC				BF			
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	k
1	3,08	0,10	0,13	2,78	0,70	0,00	0,01	1,96
2	2,23	0,03	0,04	2,57	0,50	0,03	0,03	2,45
3	3,02	0,05	0,06	2,78	0,66	0,00	0,01	1,96
4	3,46	0,04	0,06	2,78	0,71	0,01	0,02	2,09
5	2,13	0,07	0,08	2,78	0,45	0,01	0,01	1,97
6	3,03	0,07	0,08	2,78	0,67	0,00	0,01	1,97
7	3,47	0,03	0,04	2,57	0,72	0,01	0,01	1,97
8	2,61	0,02	0,03	2,36	0,66	0,01	0,01	1,97
9	2,11	0,04	0,05	2,78	0,47	0,01	0,01	1,97
10	2,59	0,04	0,05	2,78	0,58	0,00	0,01	1,97
11	4,11	0,10	0,13	2,78	0,89	0,00	0,01	1,96
12	1,93	0,03	0,04	2,57	0,41	0,01	0,01	2,02
13	1,91	0,07	0,09	2,78	0,42	0,00	0,01	1,96
14	2,37	0,02	0,02	2,31	0,68	0,01	0,01	1,97

Conforme mostra a Tab. 4.13, os valores médios após o brunimento convencional estão distribuídos no intervalo de 1,91 μm a 4,11 μm , sendo a maior média atribuída ao bloco 11 e a menor média ao bloco 13. O desvio-padrão exibiu valores dentro do intervalo de 0,02 μm a 0,10 μm , sendo o menor valor associado aos cilindros dos blocos 8 e 14 e o maior valor para o bloco 1.

Após o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios encontraram-se no intervalo de 0,41 μm a 0,89 μm , observando-se o maior e o menor valor para os blocos 11 e 12, respectivamente. A média total do desvio de circularidade no plano 2 dos cilindros foi de 0,61 μm . O desvio-padrão obteve valores iguais a 0 (zero) e 0,01 μm , evidenciando a excelente precisão dos valores obtidos, com exceção do cilindro do bloco 2, que apresentou desvio-padrão de 0,03 μm .

A incerteza expandida após o brunimento convencional obteve valores dentro do intervalo de 0,02 μm a 0,13 μm , sendo atribuído o menor valor ao cilindro do bloco 14 e o maior valor ao cilindro do bloco 1. Durante a avaliação da incerteza, constatou-se que a variabilidade das leituras foi à variável que mais contribuiu para a incerteza final com 98,5% de contribuição. Já após o brunimento convencional mais o flexível os valores de incerteza

apresentaram-se iguais a $0,01\ \mu\text{m}$, com exceção dos cilindros dos blocos 2 e 4, que exibiram valores de $0,03\ \mu\text{m}$ e $0,02\ \mu\text{m}$ respectivamente. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a calibração da MMDF com 75,0% de contribuição, com restrição dos blocos 2 e 4, em que a variável que mais contribuiu foi a variabilidade das leituras com 80,3% de contribuição.

A Figura 4.14 mostra a distribuição dos valores médios dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

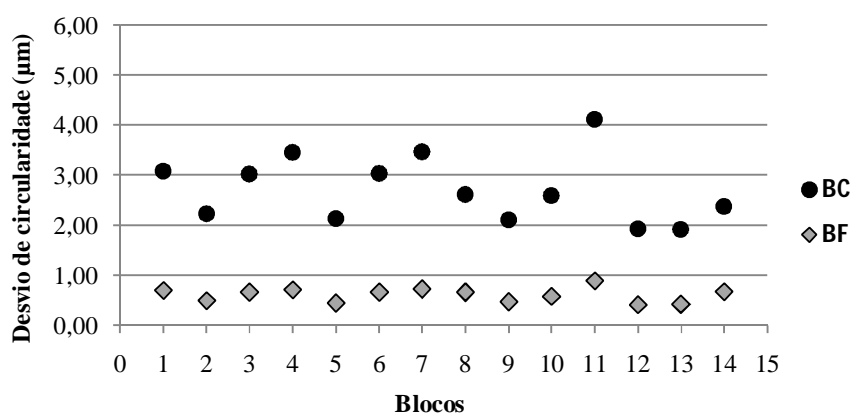


Figura 4.14 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

De acordo com a Fig. 4.14, é verificada novamente uma redução significativa dos desvios de circularidade dos cilindros e valores similares após o brunimento convencional mais o flexível.

Na Figura 4.15, são apresentados os valores médios dos desvios de circularidade dos cilindros usinados por ambas as operações com a diferença percentual de um processo para o outro.

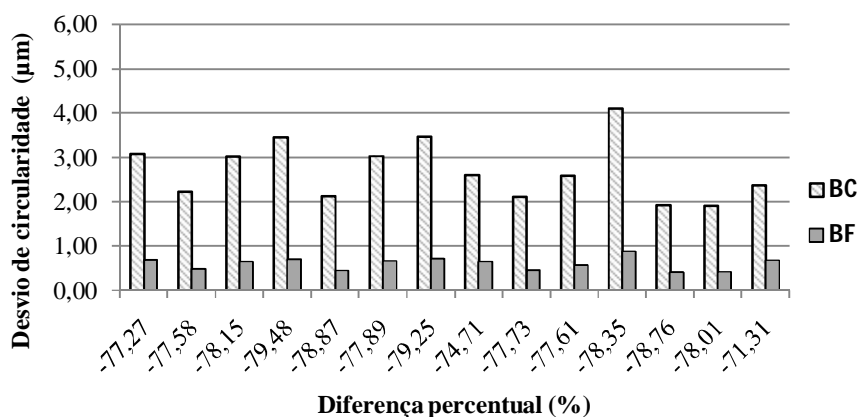


Figura 4.15 – Valores médios dos desvios de circularidade no plano 3 dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conforme mostra a Fig. 4.15, os valores mínimos e máximos verificados para a diferença percentual foram de 71,3% e 79,5%, para os cilindros dos blocos 14 e 4, respectivamente, enquanto que a diferença média percentual total do desvio de circularidade no plano 3 dos cilindros de um processo para o outro foi de 77,5%.

A seguir são exibidos, os gráficos de circularidade do cilindro do bloco 4, após o brunimento convencional (Fig.4.16a) e após o convencional mais o brunimento flexível (Fig.4.16b).

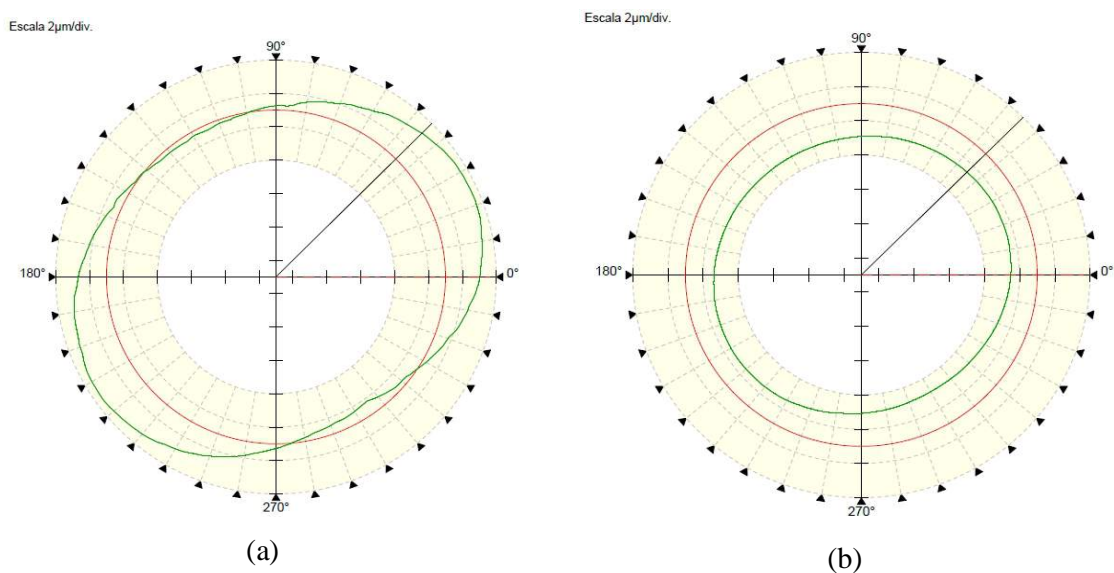


Figura 4.16 – Gráficos dos desvios de circularidade obtido para o bloco 4 (a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.

Observa-se na Fig. 4.16, que os gráficos obtidos na posição 3 são similares aos verificados nos planos 1 e 2.

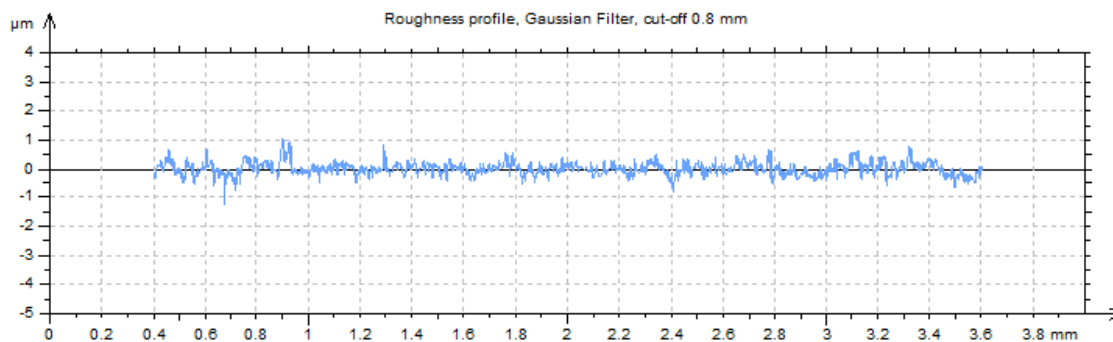
Pode-se concluir que o brunimento flexível reduziu de forma significativa os valores médios dos desvios de circularidade em diferentes planos, para todos os cilindros avaliados. Com este processo é possível atender tolerâncias de forma (circularidade) mais estreitas com custo relativamente baixo (acréscimo de R\$ 0,18/cilindro) e mesmo tempo de usinagem que o brunimento convencional (9 segundos/cilindro). A precisão dos valores médios dos desvios de circularidade, em condições de repetibilidade, também melhorou e como consequência a incerteza de medição foi menor, aumentando-se assim a confiabilidade dos valores de circularidade após o brunimento flexível.

4.5. Rugosidade do cilindro

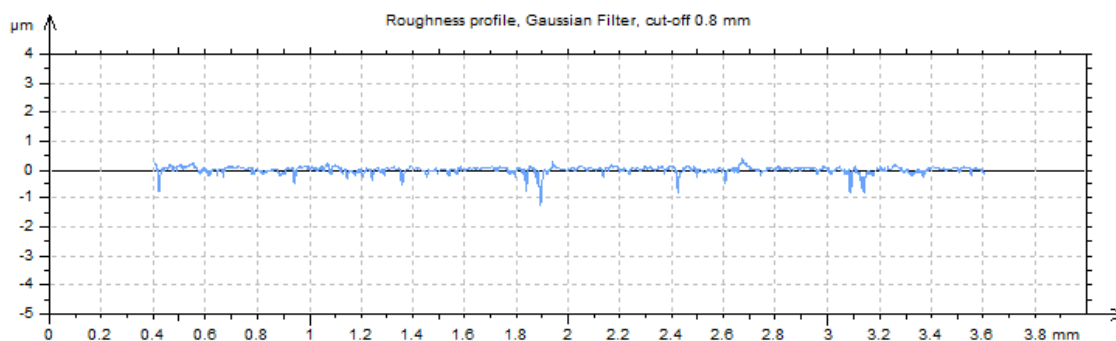
A avaliação da rugosidade dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível foi abordada em 11 etapas, são elas: (1) perfis efetivos obtidos através das medições com e sem contato; (2) topografia do perfil de rugosidade; (3) curva de *Abbott-Firestone*; (4) desvio aritmético médio do perfil de rugosidade; (5) desvio aritmético quadrático do perfil de rugosidade; (6) altura total do perfil de rugosidade; (7) fator de assimetria do perfil de rugosidade; (8) fator de achatamento do perfil de rugosidade; (9) região de pico do perfil de rugosidade; (10) região de vale do perfil de rugosidade e (11) rugosidade do núcleo do perfil.

4.5.1. Perfis efetivos obtidos através das medições com e sem contato

Os perfis efetivos adquiridos na medição com contato foram obtidos para 14 cilindros medidos em quatro posições distintas. A fim de avaliar as diferenças dos perfis de rugosidade obtidos pelos dois processos de brunimento para o mesmo cilindro, são apresentados a seguir os perfis efetivos referentes ao cilindro do bloco 12 para a medição 1 na posição 1 e usinado pelo brunimento convencional (Fig. 4.17a) e convencional mais o flexível (Fig. 4.17b).



(a)



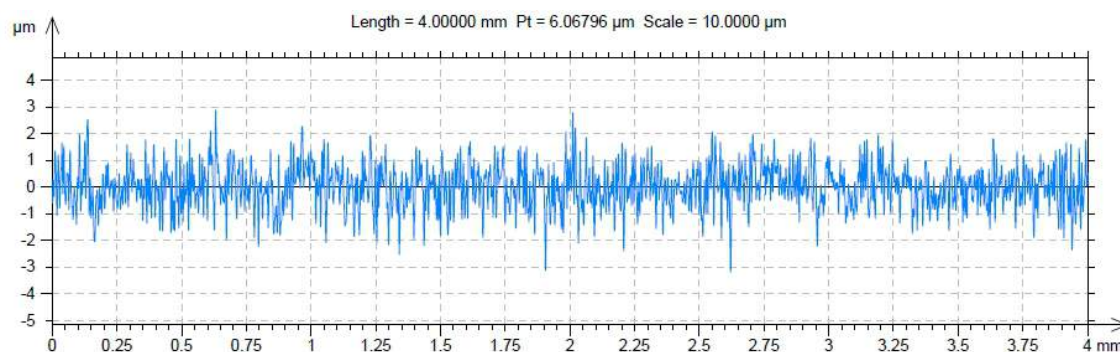
(b)

Figura 4.17- Perfil efetivo obtido para o cilindro do bloco 12 na posição 1(a) após o brunimento convencional e (b) após o brunimento convencional mais o flexível.

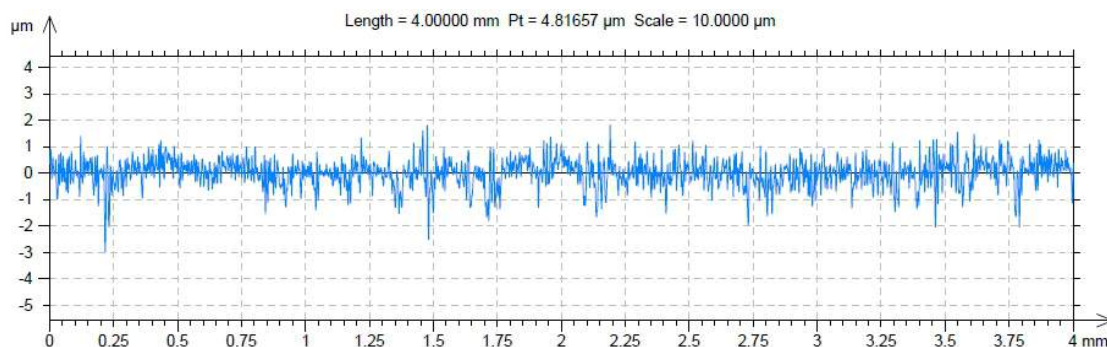
Na Figura 4.17a constata-se a presença de picos e vales estreitos isolados, com valores de altura e profundidade máximas de aproximadamente $1,0\ \mu\text{m}$ para três picos e $1,5\ \mu\text{m}$ para 1 (um) vale. Comparando-se este perfil com aquele mostrado na Fig. 4.17b, verifica-se que os picos isolados foram removidos e a altura média reduzida, apresentando valores máximos de aproximadamente $0,5\ \mu\text{m}$, enquanto que os vales permaneceram com valores de profundidade praticamente inalterados. Portanto, observa-se uma redução da altura dos picos e a permanência dos vales no perfil de rugosidade do cilindro após o brunimento convencional mais o flexível. Perfis efetivos similares foram obtidos para todos os cilindros nas quatro posições de medição.

Os perfis efetivos obtidos na medição sem contato por meio do interferômetro foram avaliados para dois cilindros, identificados como bloco 9 e bloco 15. O cilindro referente ao bloco 15 foi usinado pelo brunimento convencional e seu perfil efetivo é apresentado na

Fig. 4.18a, enquanto que o cilindro referente ao bloco 9 foi usinado pelo brunimento convencional mais o flexível e é apresentado na Fig. 4.18b.



(a)



(b)

Figura 4.18- Perfil efetivo obtido na medição sem contato para (a) cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional e (b) cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Nota-se na Figura 4.18a, que o perfil efetivo do cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional, apresenta altura máxima dos picos de $3,0\ \mu\text{m}$ e altura média de aproximadamente $2,0\ \mu\text{m}$, enquanto que a profundidade dos vales exibiu valores máximo e médio de $3,0\ \mu\text{m}$ e $2,0\ \mu\text{m}$, respectivamente. Observa-se a presença de picos e vales estreitos isolados.

Para a Figura 4.18b, referente ao perfil efetivo do cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, verifica-se altura máxima e média dos picos de $2,0\ \mu\text{m}$ e $1,0\ \mu\text{m}$, respectivamente e, valores máximo e mínimo de profundidade de $3,0\ \mu\text{m}$ e $2,0\ \mu\text{m}$. Constata-se que o brunimento flexível reduziu a altura dos picos isolados em aproximadamente $1,0\ \mu\text{m}$. Constata-se a presença de alguns vales isolados com profundidade

de 3,0 μm e uma pequena redução da profundidade de outros vales, que pode ser justificada ao fato da peça analisada não ser a mesma, bem como ao posicionamento da linha média.

A escolha das peças para avaliação das diferenças entre os resultados obtidos na medição com e sem contato da rugosidade foi baseada em cilindros que possuíam perfis e parâmetros de rugosidade similares depois de usinados pelo brunimento convencional, porém não é possível comparar com exatidão pontos apalpados em superfícies diferentes. Percebe-se também, que o perfil obtido na medição sem contato apresentou valores maiores de altura dos picos e profundidade dos vales, quando comparado à medição com contato. Isto pode ser explicado em razão da impossibilidade da ponta do apalpador do rugosímetro eletromecânico acessar os vales mais estreitos, pois apresenta um raio da ponta igual a 5,0 μm .

Portanto, conclui-se que o brunimento flexível aplicado após o brunimento convencional reduz a altura média dos picos, bem como diminui a presença destes de forma isolada, sem alterar a profundidade dos vales, fato que pode ser observado tanto para cilindros diferentes usinados por cada processo (Fig. 4.18), quanto para o mesmo cilindro antes e após o brunimento flexível (Fig. 4.17).

4.5.2. Topografia do perfil de rugosidade

São apresentadas a seguir, a imagem em 2D (Fig. 4.19a) e a topografia da superfície do cilindro usinado pelo brunimento convencional (Fig. 4.19b), referente ao bloco 15 e, a imagem (Fig. 4.19c) e a topografia do cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (Fig. 4.19d), referente ao bloco 9.

Na Figura 4.19 as diferentes cores evidenciam as diferenças entre as ordenadas dos pontos que definem a superfície efetiva. Observam-se sulcos paralelos entre si, deixados pela ferramenta de corte durante o processo de brunimento convencional. Observa-se que mesmo após a aplicação dos filtros ainda permanece uma superfície com formato cilíndrico, evidenciado pelas bordas em cor amarelo.

Ao comparar a topografia das superfícies obtidas após o brunimento convencional (Fig. 4.19b) e após o brunimento convencional mais o flexível (Fig. 4.19d) observam-se que as cores presentes em cada uma delas são diferentes, bem como a faixa de valores da referida escala. O brunimento convencional mostra uma topografia que se estende por 7,0 μm , enquanto que o brunimento convencional mais o flexível abarca 4,5 μm . Isto denota uma redução significativa dos valores das ordenadas dos pontos da ordem de 35,0%.

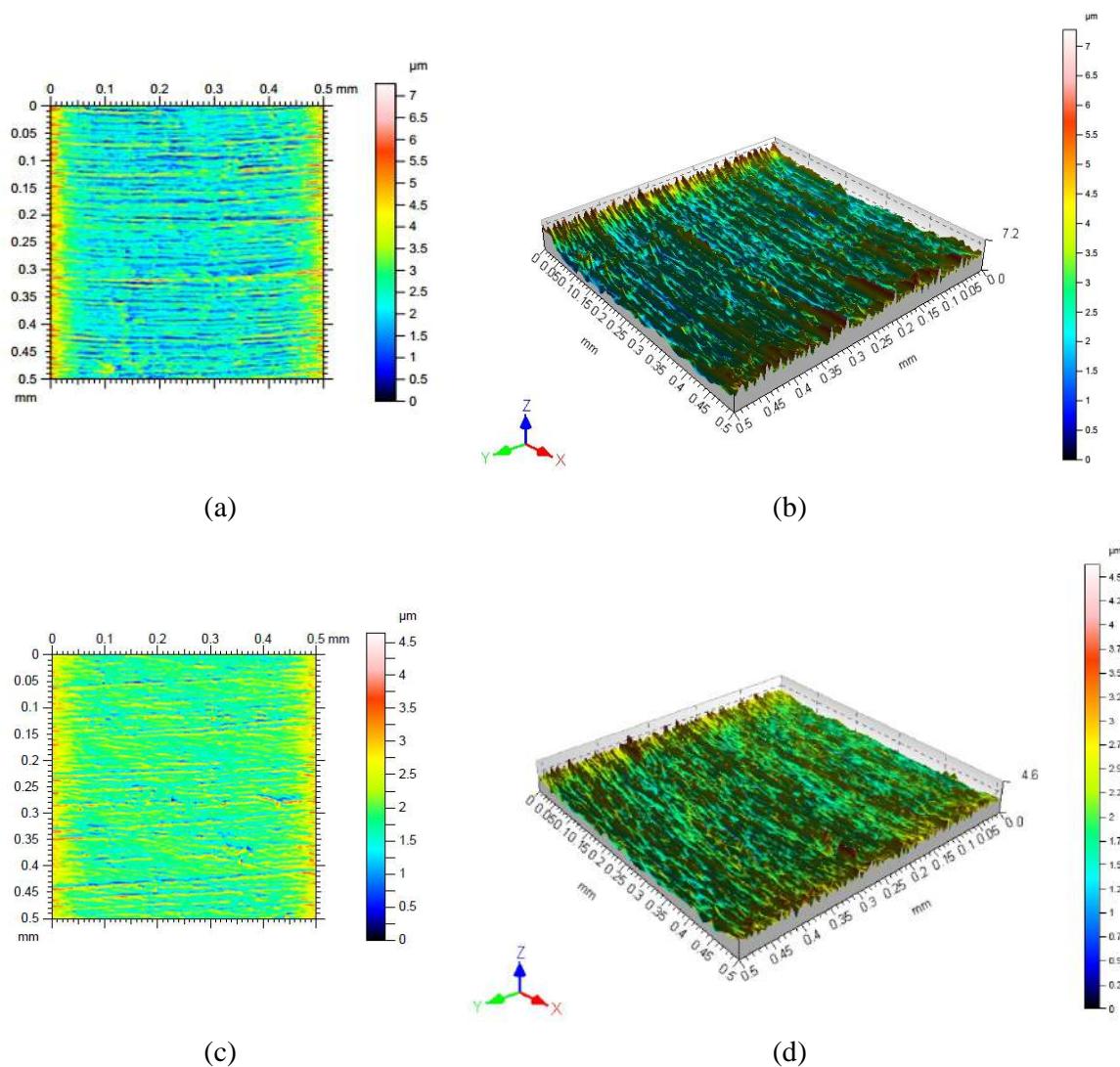


Figura 4.19 – (a) Imagem e (b) topografia da superfície do cilindro usinado pelo brunimento convencional, referente ao bloco 15 e (c) imagem e (d) topografia da superfície do cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, referente ao bloco 9.

4.5.3. Curva de Abbott-Firestone

São mostradas a seguir, as curvas de *Abbott-Firestone* obtidas na medição com contato para o cilindro do bloco 12, após o brunimento convencional (Fig. 4.20a) e após o brunimento convencional mais o flexível (Fig. 4.20b), para a posição 3.

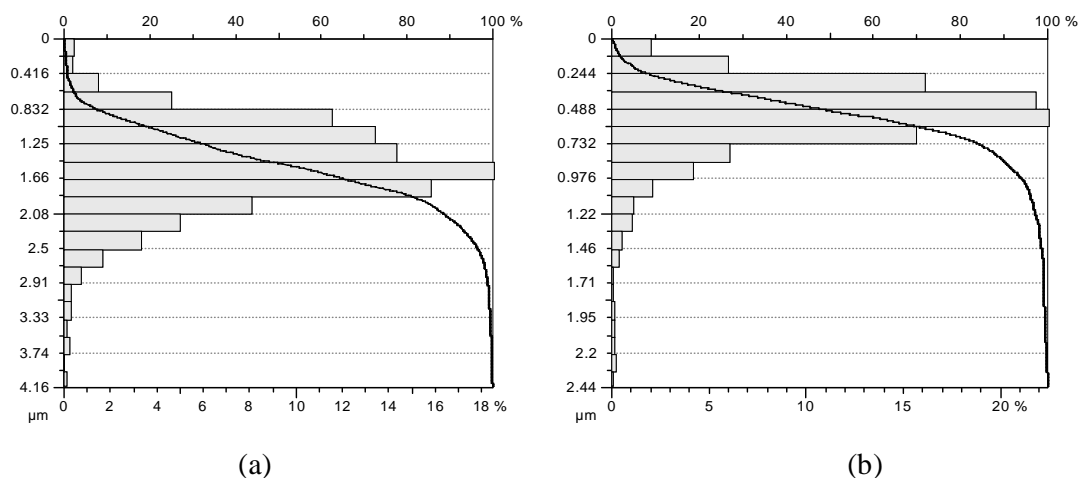


Figura 4.20- Curva de *Abbott-Firestone* obtida na medição com contato na posição 3, para o cilindro do bloco 12, usinado pelo (a) brunimento convencional e (b) pelo convencional mais o flexível.

A curva de *Abbott-Firestone* mostrada na Fig. 4.20a, relativa ao cilindro do bloco 12 usinado pelo brunimento convencional, mostra que 10% do material do cilindro, corresponde a 0,832 μm da altura do perfil. De 0,832 μm a 2,080 μm de altura, encontra-se 80% do material, para 1,455 μm de altura tem-se 50% do material, restando para 2,080 μm os últimos 10% de material. Já a curva obtida na Fig. 4.20b, referente ao cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, revela que 10% do material esta localizado em 0,244 μm , enquanto que 80% do material esta entre 0,244 μm e 0,976 μm de altura. Os 10% de material restante, encontram-se em 0,976 μm de altura.

Verifica-se que o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível apresentou maior parte do material localizado na parte inferior do perfil, comparado ao perfil obtido pelo brunimento convencional, consequentemente a linha média desloca-se para cima. Isto comprova a redução da altura dos picos do perfil obtido após o brunimento flexível. Este fato é verificado através da análise do parâmetro de assimetria *Rsk*, abordado neste capítulo.

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

São apresentados a seguir nas Tabs. 4.14 a 4.17 os valores médios do parâmetro *Ra*, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95,45%) e coeficientes de assimetria da distribuição de probabilidades obtida durante a simulação de MC, para as posições de medição 1 a 4, respectivamente, para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.14 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) medidos na posição 1.

	BC				BF			
Bloco	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	CA	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	CA
1	0,17	0,01	0,07	0,00	0,12	0,04	0,08	0,00
2	0,29	0,11	0,12		0,14	0,03		0,01
3	0,25	0,04	0,08		-0,01	0,14		0,04
4	0,18	0,01	0,07	0,01	0,15	0,06		0,00
5	0,23	0,07	0,09	0,00	0,13	0,04		
6	0,17	0,01	0,07	0,01	0,13	0,04		
7	0,23	0,07	0,10	0,00	0,12	0,03		
8	0,23	0,03	0,08		0,16	0,04		
9	0,20	0,06	0,09		0,12	0,05	0,09	0,01
10	0,23	0,05		0,12	0,04	0,08	0,00	
11	0,21	0,10	0,11	-0,01	0,16	0,07		0,10
12	0,25	0,10		0,11	0,06	0,09	0,08	-0,01
13	0,16	0,02	0,07	0,00	0,12	0,03		
14	0,20	0,05	0,08	0,01	0,12	0,04		0,00

Tabela 4.15 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) medidos na posição 2.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,27	0,11	0,13	0,20	0,11	0,12
2	0,26	0,15	0,16	0,15	0,07	0,10
3	0,28	0,09	0,11	0,18	0,09	0,11
4	0,18	0,01	0,08	0,18	0,05	0,09
5	0,30	0,12	0,14	0,16	0,09	0,12
6	0,30	0,14	0,15	0,21		0,11
7	0,29	0,13		0,18	0,07	0,10
8	0,32	0,14		0,23	0,09	0,11
9	0,30	0,16	0,16	0,16	0,08	0,11
10	0,31	0,13	0,14	0,17		
11	0,25	0,12	0,13	0,19		
12	0,26	0,10	0,12	0,18		
13	0,20	0,02	0,08	0,20	0,07	0,10
14	0,25	0,11	0,13	0,17		

Tabela 4.16 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) medidos na posição 3.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,21	0,05	0,09	0,16	0,05	0,09
2	0,26	0,08	0,11	0,19	0,03	0,08
3	0,29	0,04	0,09	0,16	0,04	0,09
4	0,25	0,07	0,10	0,14	0,05	0,09
5	0,24	0,05	0,09	0,17	0,06	0,10
6	0,23	0,07	0,10	0,16	0,04	0,09
7	0,23	0,06	0,10	0,16	0,04	0,09
8	0,23	0,07	0,10	0,14	0,05	0,09
9	0,22	0,06	0,10	0,15	0,02	0,08
10	0,22	0,05	0,09	0,16	0,05	0,09
11	0,24	0,06	0,10	0,14	0,04	0,09
12	0,23	0,07	0,10	0,12	0,02	0,08
13	0,21	0,05	0,09	0,13	0,03	0,08
14	0,28	0,08	0,11	0,16	0,06	0,10

Tabela 4.17 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e coeficiente de assimetria (CA) do Ra em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) medidos na posição 4.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,26	0,08	0,11	0,20	0,07	0,10
2	0,25	0,10	0,12	0,16	0,06	0,10
3	0,29	0,04	0,09	0,21	0,07	0,10
4	0,26	0,12	0,13	0,16	0,06	0,10
5	0,36	0,12	0,14	0,18	0,08	0,11
6	0,29	0,09	0,11	0,19	0,08	0,10
7	0,28	0,11	0,13	0,19	0,09	0,11
8	0,32	0,11	0,13	0,18	0,08	0,11
9	0,30	0,11	0,13	0,17	0,06	0,10
10	0,27	0,10	0,12	0,18	0,07	0,10
11	0,32	0,10	0,12	0,18	0,09	0,11
12	0,30	0,12	0,13	0,17	0,07	0,10
13	0,29	0,07	0,10	0,19	0,08	0,11
14	0,26	0,12	0,13	0,18	0,07	0,10

Conforme mostram as Tabs. 4.14 a 4.17, os valores médios de Ra sofreram uma redução significativa após o brunimento convencional mais o flexível nas quatro posições avaliadas em todos os cilindros. Uma comparação dos resultados mostra que na posição 1, Tab. 4.14, os valores de Ra para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,16 μm a 0,29 μm , enquanto que o brunimento convencional mais o flexível exibe valores entre 0,11 μm e 0,16 μm . Ainda, o valor médio total obtido para os brunimentos convencional e convencional mais o flexível foi de 0,21 μm e 0,13 μm , respectivamente.

Na posição 2, Tab. 4.15, observa-se que os valores médios de Ra após o brunimento convencional estão no intervalo de 0,18 μm a 0,31 μm e após o brunimento convencional mais o flexível, estes variaram entre 0,15 μm e 0,23 μm . Os valores médios obtidos durante a medição de Ra na posição 2, se mostraram maiores que os valores médios obtidos para a posição 1, tanto para o brunimento convencional quanto para o flexível, apresentando média total de 0,27 μm e 0,18 μm , para cada processo respectivamente. A mesma tendência foi constatada para o desvio-padrão e consequentemente para a incerteza expandida. No entanto, a média da diferença percentual para as posições 1 e 2 apresentaram valores próximos de 36,0% e 31,0%.

Por sua vez, na posição 3, Tab. 4.16, os valores médios de Ra após o brunimento convencional estão no intervalo de 0,25 μm a 0,36 μm e após o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios variaram entre 0,16 μm e 0,21 μm . Os valores médios obtidos nesta posição, se mostraram maiores que os valores médios obtidos na posição 1 e menores que os obtidos na posição 2, tanto para o brunimento convencional quanto para o convencional mais o flexível, apresentando média total de 0,24 μm e 0,15 μm , para cada processo respectivamente.

De acordo com a Tab. 4.17, os valores médios de Ra (posição 4) após o brunimento convencional estão no intervalo de 0,25 μm a 0,36 μm , enquanto que para o brunimento convencional mais o flexível, os valores médios variaram entre 0,16 μm e 0,21 μm . O maior valor médio total após o brunimento convencional foi constatado para esta posição, de 0,29 μm . Já após o convencional mais o flexível, exibiu a mesma média total que a posição 2, de 0,18 μm .

Com relação aos valores de desvios-padrão associados à medição de Ra após o brunimento convencional mais o flexível, verifica-se que estes são menores que aqueles encontrados após o brunimento convencional, indicando que a inclusão do brunimento flexível após este processo confere uma maior repetibilidade.

Na Figura 4.21 são apresentados os valores máximos de desvio-padrão (68,27%) obtidos em cada posição para ambos os processos.

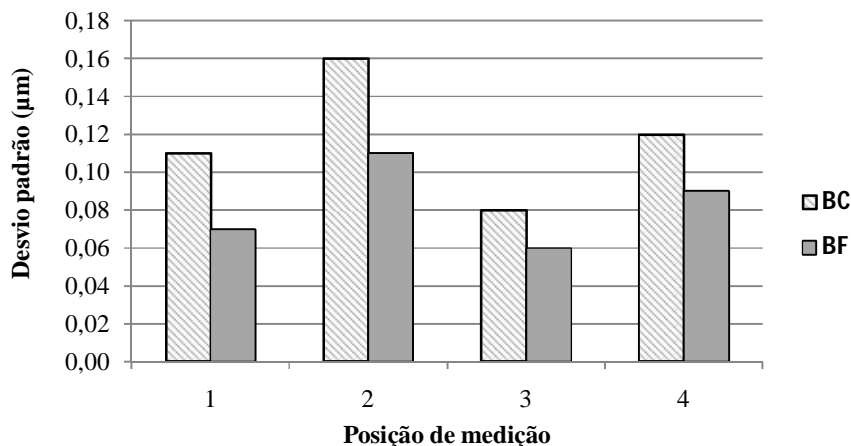


Figura 4.21 - Valores máximos de desvios-padrão (68,27%) associados à medição de Ra após o brunimento convencional (BC) e após o brunimento convencional mais o flexível (BF).

A partir da Fig. 4.21 se conclui que os valores de desvios-padrão após o brunimento convencional mais o flexível, são significativamente menores quando comparados aos valores obtidos após o brunimento convencional. No pior caso a redução foi de 25,0% (posição 3).

As Figuras 4.22 a 4.25 auxiliam na interpretação dos resultados. Estas figuras mostram a distribuição dos valores médios de Ra nas diferentes posições, dos cilindros usinados pelo por ambos os processos, com barra de erros associada ao desvio-padrão (68,27%).

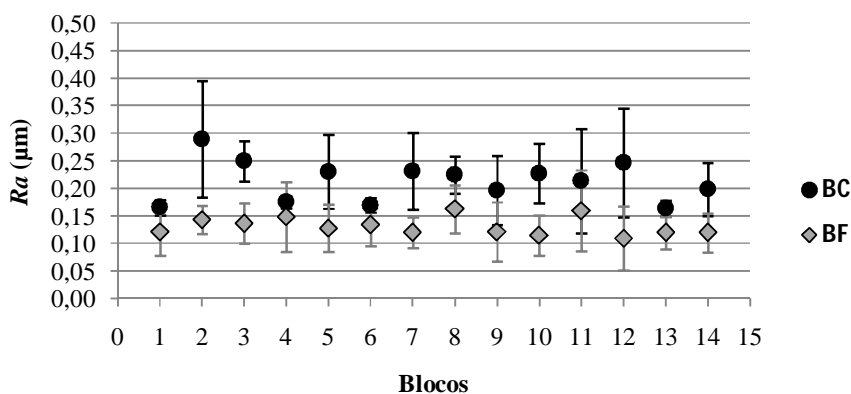


Figura 4.22 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF), com barra de erros associado ao desvio-padrão.

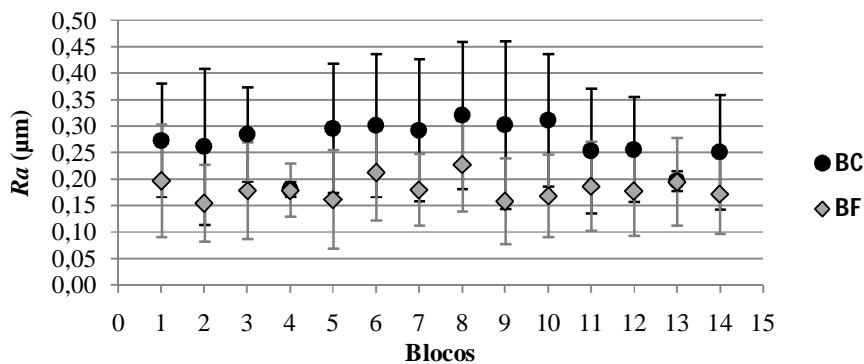


Figura 4.23 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF), com barra de erros associado ao desvio-padrão.

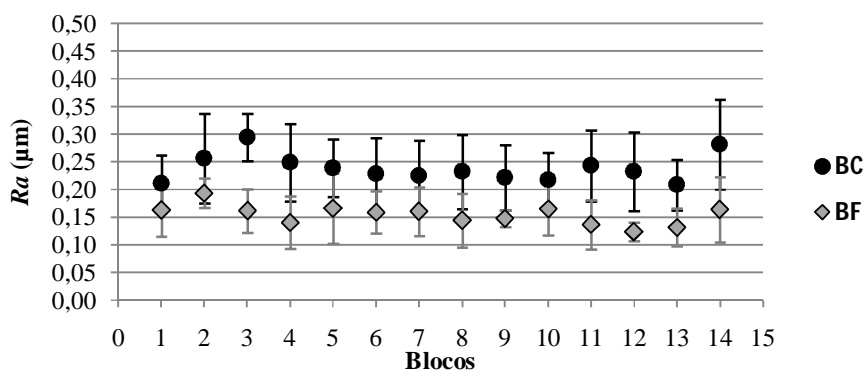


Figura 4.24 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF), com barra de erros associado ao desvio-padrão.

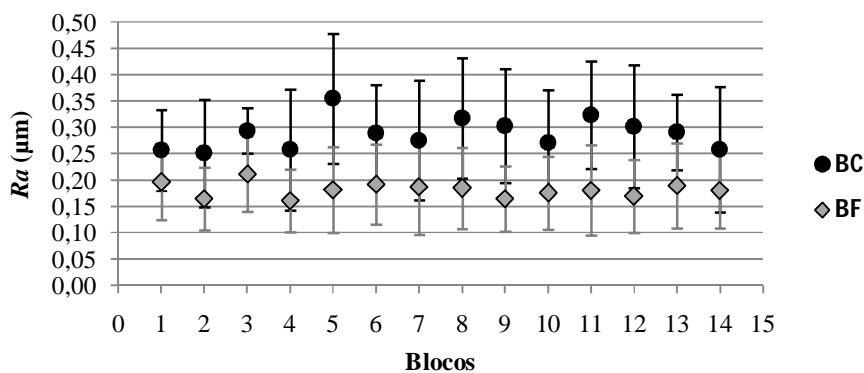


Figura 4.25 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF), com barra de erros associado ao desvio-padrão.

Conforme pode ser visualizado nas Figs. 4.21 a 4.25, os valores médios de Ra obtidos após o brunimento convencional mais o flexível apresentam uma menor dispersão, fato que contribui para o controle do processo de fabricação e montagem do par pistão-cilindro. A faixa de valores atribuídos ao desvio-padrão mostra-se parcialmente superpostas para quase todos os blocos, quando considerados os dois processos de usinagem.

A seguir são apresentados nas Figs. 4.26 a 4.29, a redução dos valores de Ra nas posições 1 a 4, respectivamente, dos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível. Com o intuito de quantificar esta redução, são apresentados, nestas figuras, os valores médios de Ra , dos cilindros usinados por ambas as operações com a diferença percentual de um processo para o outro.

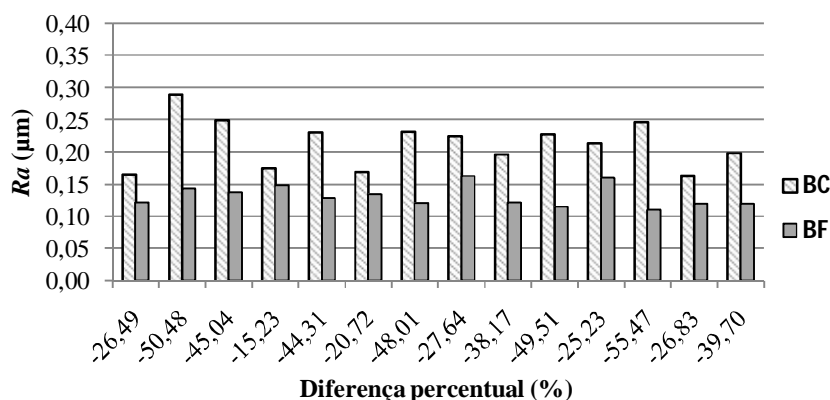


Figura 4.26 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

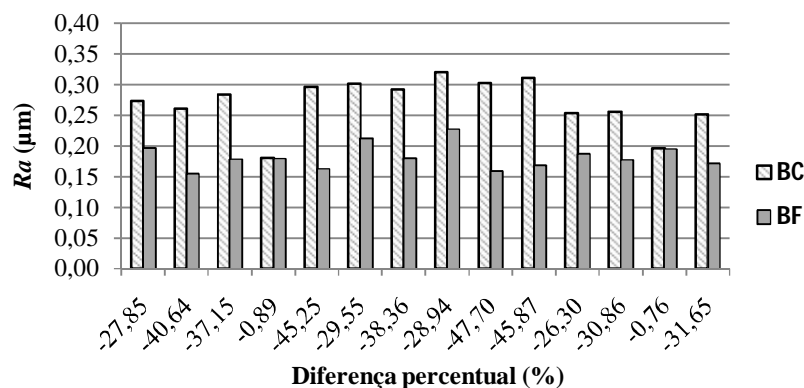


Figura 4.27 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

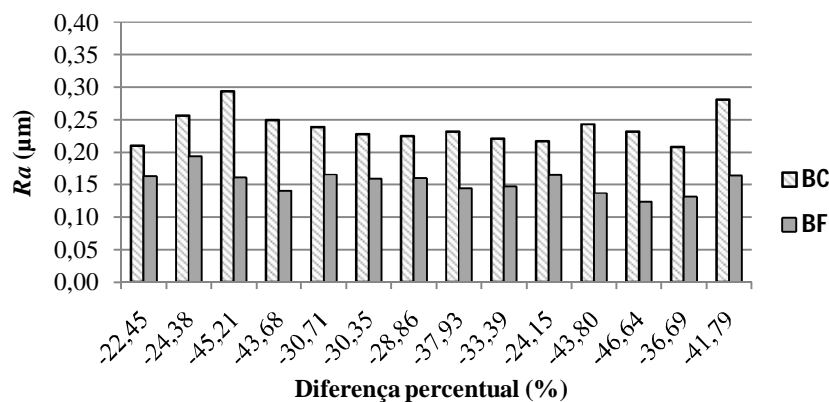


Figura 4.28 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

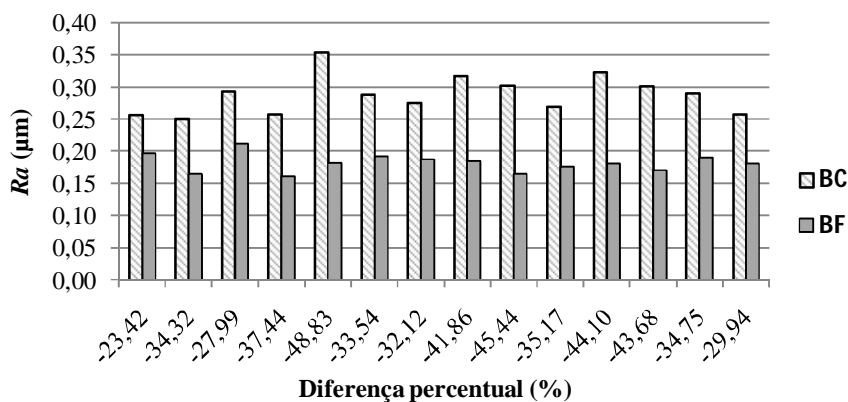


Figura 4.29 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

De acordo com a Fig. 4.26, os valores mínimos e máximos verificados para a diferença percentual na posição 1, foram de 15,2% e 55,5%, para os cilindros dos blocos 4 e 12, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 36,3%. É importante ressaltar que a redução observada não é uniforme, uma vez que os pontos apalpados na superfície do cilindro, durante a medição da rugosidade, após cada brunimento, não são os mesmos. Portanto, não é possível comparar com exatidão os valores obtidos para Ra em uma determinada posição de um processo para o outro. No entanto, ainda assim esta redução é perceptível e significativa, de aproximadamente 35,0% para todas as posições.

A Figura 4.30 mostra o histograma obtido durante a aplicação do método de MC na avaliação da incerteza de medição de Ra na posição 1, do cilindro do bloco 12 após o brunimento convencional mais o flexível.

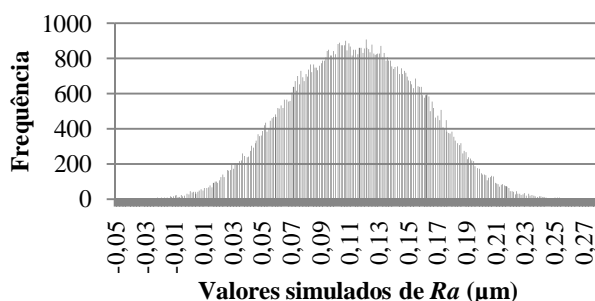


Figura 4.30 – Histograma da função densidade de probabilidade do parâmetro de rugosidade Ra referente ao cilindro do bloco 12, medido na posição 1, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

De acordo com a Fig.4.30 verifica-se que a distribuição dos valores de Ra simulados pelo método de MC possui um formato próximo da distribuição normal. Histogramas similares foram obtidos para Ra em todas as posições de medição e para todos os blocos para 100.000 iterações, por tal motivo não são aqui apresentados.

Verifica-se na Tab. 4.14, que a incerteza expandida apresentou valores entre 0,07 μm e 0,12 μm após o brunimento convencional, e entre 0,08 μm e 0,10 μm após o brunimento convencional mais o flexível.

A seguir são mostrados na Tab. 4.18 os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95,45%) do parâmetro de rugosidade Ra , medido na posição 1, do cilindro do bloco 12 usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

De acordo com a Tab. 4.18, a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi à incerteza associada à ponta da agulha, sendo também a variável que mais contribuiu para as posições 2, 3, e 4. Esta apresenta uma contribuição com valores de incerteza padrão de 0,058 μm . O coeficiente de assimetria é de -0,0008, evidenciando a simetria da distribuição.

Tabela 4.18 - Avaliação da incerteza para Ra na posição 1, do cilindro 12 usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, em que: (TI) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza					
Grandeza	Estimativa (μm)	TI	DP	GL	Incerteza padrão
$\Delta s(L_R)$	0,06	A	Normal	4	0,02639 μm
ΔR_{Rug}	0,01	B	Retangular	∞	0,00289 μm
ΔIC_{Rug}	0,03	B	Normal	∞	0,01299 μm
ΔD	0,02	B	Retangular	∞	0,01155 μm
ΔA_{Rug}	0,10	B	Retangular	∞	0,05773 μm
Incerteza padrão combinada (u_c)					0,04484 μm
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					∞
Fator de abrangência (k)					2,00
Coeficiente de assimetria (<i>skewness</i>)					-0,00089
Incerteza expandida (U)					0,08968 μm

A seguir, nas Figs. 4.31 a 4.34 são apresentados os valores médios de Ra após ambas as operações de brunimento com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%).

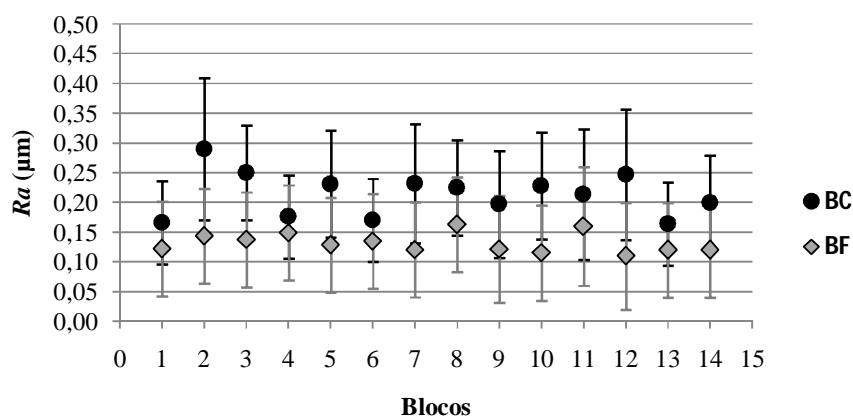


Figura 4.31 – Valores médios de Ra na posição 1, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

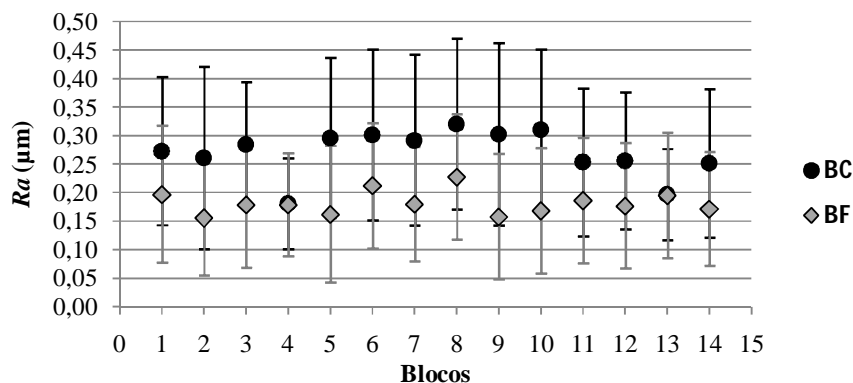


Figura 4.32 – Valores médios de Ra na posição 2, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

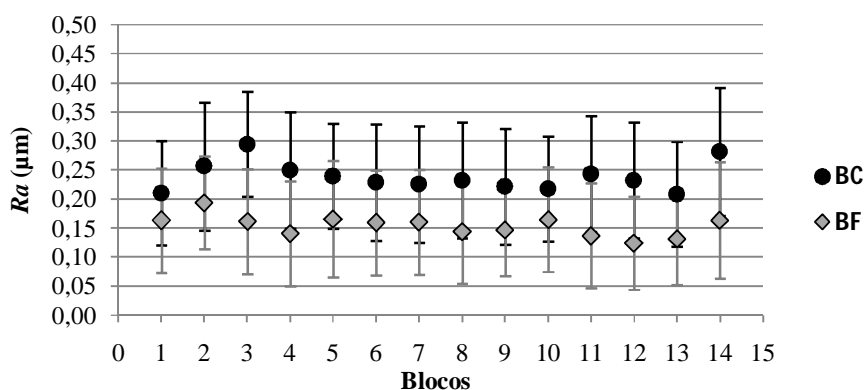


Figura 4.33 – Valores médios de Ra na posição 3, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

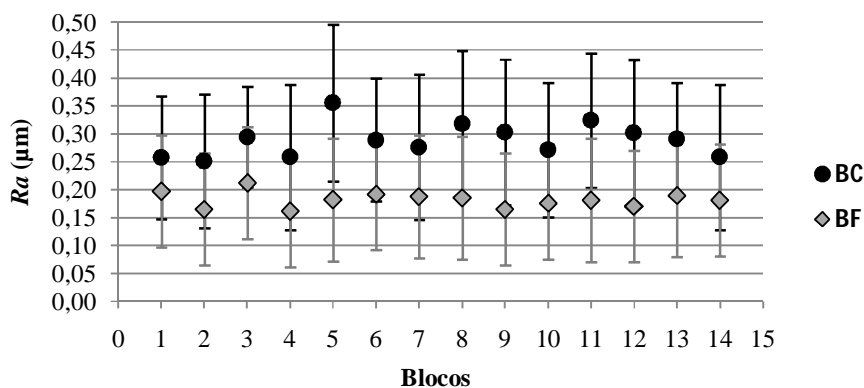


Figura 4.34 – Valores médios de Ra na posição 4, dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

Nota-se nas Figs. 4.31 a 4.34 que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Ra de cada um dos cilindros, após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas. Ainda, houve uma diminuição significativa dos valores de incerteza expandida em todos os casos seguindo a tendência do desvio padrão experimental.

Na posição 2 (Fig. 4.32), a incerteza expandida apresentou valores máximos de $0,16\text{ }\mu\text{m}$ e $0,12\text{ }\mu\text{m}$, após os processos de brunimento convencional e convencional mais o flexível, respectivamente.

Verifica-se na posição 3 (Fig. 4.33), valores máximos de incerteza expandida de $0,11\text{ }\mu\text{m}$ após o brunimento convencional e de $0,10\text{ }\mu\text{m}$ após o convencional mais o flexível. Por sua vez, na posição 4 (Fig. 4.34) observa-se que após o brunimento convencional e o convencional mais o flexível, a incerteza expandida exibiu valores de $0,14\text{ }\mu\text{m}$ e de $0,11\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente.

Após as análises efetuadas pode-se concluir que o brunimento flexível aplicado após o brunimento convencional proporcionou uma redução significativa dos valores médios do parâmetro de rugosidade Ra , em todas as posições para todos os cilindros avaliados, de aproximadamente 35,0%. Os valores de desvio-padrão também foram menores em todos os casos, bem como a incerteza expandida associada à medição. Desta forma, este processo de usinagem confere maior repetibilidade aos valores de Ra dos cilindros e maior confiabilidade. Este parâmetro não deve ser avaliado isoladamente, uma vez que o valor de Ra não caracteriza as irregularidades do perfil, não diferencia picos de vales e pode ocultar a presença destes não típicos no perfil de rugosidade.

Observa-se que os resultados apresentados para o parâmetro Ra foram similares nas quatro posições de avaliação, apresentando uma variação relativamente pequena dos valores médios, desvios-padrão e incerteza expandida, fato que não caracteriza variação significativa entre as posições, uma vez que a análise é efetuada para pontos distintos. Com base nisso, para os demais parâmetros abordados a seguir, são apresentados somente os resultados obtidos na posição 1.

4.5.5. Avaliação do Ra na medição sem contato

O parâmetro Ra também foi obtido através da medição sem contato, para os cilindros dos blocos 9 e 15. A seguir são apresentados na Tab. 4.19 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incerteza expandida (95,45%) e diferença percentual, obtida para cada bloco, em

que, o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.19 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Ra para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

	BC	BF	DP (%)
\bar{x} (μm)	0,55	0,37	-32,02
s (μm)	0,16	0,06	-62,50
U (μm)	0,15	0,06	-60,00

De acordo com a Tab. 4.19, o brunimento convencional mais o flexível proporcionou uma redução de 32,0% do valor médio de Ra . Esta redução é condizente com a observada na medição com contato. Ainda, após este processo, o desvio-padrão mostrou uma redução de 62,5%, evidenciando a excelente precisão dos valores obtidos. Por fim, a incerteza expandida, também apresentou uma redução significativa, de 60,0%, em que, a variável que mais influenciou na incerteza final para os dois processos, foi à variabilidade das leituras, com aproximadamente 49,0% de contribuição.

A incerteza expandida associada ao parâmetro Ra obtido na medição sem contato é baseada em uma incerteza padrão multiplicado por um fator de abrangência $k = 2$, para uma distribuição normal e probabilidade de abrangência de 95,45%.

É possível verificar um aumento dos valores médios obtidos na medição sem contato em relação à medição com contato, tanto para o brunimento convencional quanto para o convencional mais o flexível. Como dito anteriormente, este fato pode ser justificado em razão da limitação da ponta do apalpador em acessar os vales mais estreitos. Portanto este processo de medição apresenta valores com maior exatidão, sendo o mais indicado para o processo fabril.

4.5.6. Desvio aritmético quadrático do perfil de rugosidade (Rq)

São apresentados a seguir na Tab. 4.20 os valores médios do parâmetro Rq , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.20 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvios-padrão (s) e incertezas expandidas (U) do Rq em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) medidos na posição 1.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,22	0,02	0,08	0,19	0,06	0,09
2	0,38	0,11	0,13	0,20	0,04	0,09
3	0,36	0,06	0,10	0,20	0,05	0,09
4	0,24	0,02	0,08	0,23	0,10	0,12
5	0,31	0,09	0,11	0,20	0,07	0,10
6	0,23	0,02	0,08	0,20	0,07	0,10
7	0,31	0,09	0,11	0,19	0,04	0,09
8	0,31	0,04	0,09	0,24	0,07	0,10
9	0,26	0,09	0,11	0,18	0,07	0,10
10	0,30	0,07	0,10	0,17	0,05	0,09
11	0,31	0,14	0,15	0,24	0,11	0,13
12	0,34	0,11	0,13	0,17	0,08	0,11
13	0,22	0,02	0,08	0,18	0,05	0,09
14	0,27	0,07	0,10	0,18	0,04	0,09

De acordo com a Tab. 4.20, os valores médios de Rq sofreram uma redução significativa após o brunimento convencional mais o flexível para todos os cilindros. A fim de comparar os resultados, constata-se que os valores de Rq para o brunimento convencional estão no intervalo de 0,22 μm a 0,38 μm , com média total de 0,29 μm , enquanto que o brunimento convencional mais o flexível exibe valores entre 0,17 μm e 0,24 μm , com média total de 0,20 μm .

Verifica-se que a tendência dos resultados obtidos para Rq foi similar à verificada na análise de Ra . Isto pode ser justificado porque estes dois parâmetros (Ra e Rq) consideram a média aritmética e quadrática, respectivamente dos valores das ordenadas dos pontos do perfil. Assim como para o parâmetro Ra , os valores de desvios-padrão associados à medição de Rq após o brunimento convencional mais o flexível apresentaram-se menores que aqueles encontrados após o brunimento convencional, atribuindo ao primeiro processo uma maior repetibilidade. Ainda, verifica-se que no pior caso, a redução foi de 15,0%.

Na Figura 4.35 é apresentada a redução dos valores de Rq , dos cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível, observada em relação ao brunimento convencional.

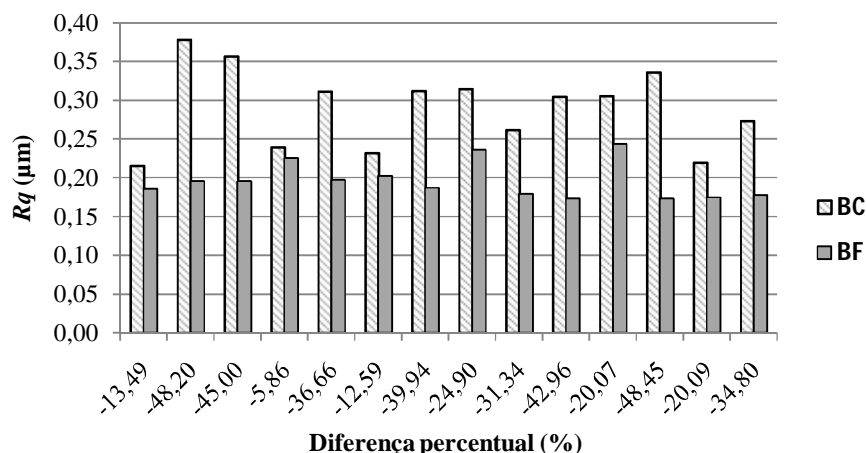


Figura 4.35 – Valores médios de Rq , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

Conforme mostra a Fig. 4.35, os valores mínimos e máximos verificados para a diferença percentual, foram de 5,9% e 48,4%, para os cilindros dos blocos 4 e 12, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 30,3%.

Verifica-se na Tab. 4.20, que a incerteza expandida apresentou valores entre 0,08 μm e 0,15 μm após o brunimento convencional e entre 0,09 μm e 0,13 μm após o brunimento convencional mais o flexível.

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à ponta do apalpador, sendo esta, a que mais contribuiu para todos os blocos após o brunimento convencional, com exceção dos blocos 2 e 11, em que a variável que mais contribuiu foi a variabilidade das leituras, a mesma observada para todos os blocos após o brunimento convencional mais o flexível.

A seguir, na Fig. 4.36 são apresentados os valores médios de Rq , após os dois processos de brunimento, com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%). Verifica-se que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Rq de cada um dos cilindros, após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas. Ainda, houve uma redução significativa dos valores de incerteza expandida em todos os casos seguindo a tendência do desvio padrão experimental.

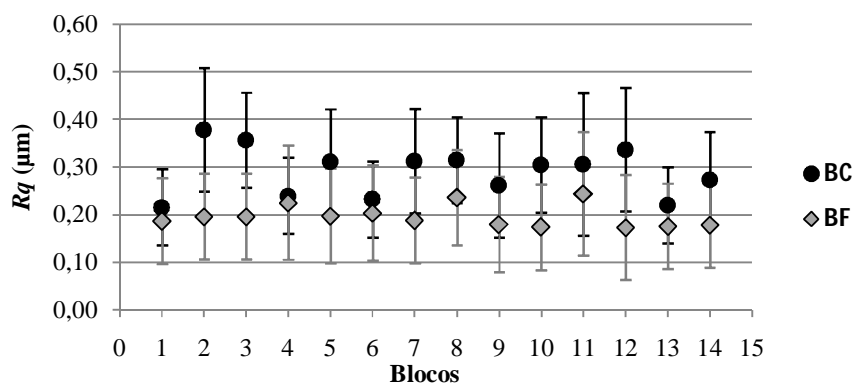


Figura 4.36 – Valores médios de Rq , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

Pode-se concluir que o brunimento flexível realizado após o brunimento convencional proporcionou uma redução significativa dos valores médios do parâmetro de rugosidade Rq , em todas as posições para todos os cilindros avaliados, de aproximadamente 30,3%. Os valores de desvio-padrão, também, foram menores em todos os casos, bem como a incerteza expandida associada à medição, conferindo maior repetibilidade aos valores de Rq dos cilindros usinados pelo brunimento flexível e maior confiabilidade.

4.5.7. Avaliação do Rq na medição sem contato

São apresentados na Tab. 4.21 os valores médios de Rq , desvios-padrão (68,27%), incerteza expandida (95,45%) e diferença percentual relativos aos blocos 15 e 9, em que, o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.21 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Rq para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

	BC	BF	DP(%)
\bar{x} (µm)	0,77	0,49	36,00
s (µm)	0,07	0,07	0,97
U (µm)	0,07	0,07	1,96

De acordo com a Tab. 4.21 o brunimento convencional mais o flexível proporcionou uma redução de 36,0% do valor médio de Rq . Esta redução é condizente com a observada na

medição com contato. No entanto, a redução observada para o desvio-padrão foi relativamente pequena, de apenas 0,9%. Por fim, a incerteza expandida, também não apresentou diferença percentual significativa, com redução de 1,9% após o brunimento convencional mais o flexível. Constatou-se que a variável que mais influenciou na incerteza final para os dois processos, foi a variabilidade das leituras, com aproximadamente 48,9% de contribuição.

Portanto, conclui-se que a medição sem contato apresentou uma redução dos valores médios aproximadamente igual a obtida na medição com contato. Todavia, esta tendência não foi verificada para o desvio-padrão e nem para a incerteza expandida. Portanto os valores obtidos na medição sem contato exibiram a mesma precisão em ambos os processos de brunimento e valores de incerteza expandida aproximados.

4.5.8. Altura total do perfil de rugosidade (R_t)

São apresentados na Tab. 4.22 os valores médios do parâmetro R_t , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.22 – Valores médios (\bar{x}), desvios-padrão (s) e incertezas expandidas (U) do R_t em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	1,66	0,33	0,31	2,14	0,69	0,62
2	4,12	1,54	1,38	2,00	0,84	0,76
3	4,01	1,34	1,21	1,74	0,11	0,13
4	2,50	0,79	0,72	2,43	1,17	1,06
5	3,28	0,52	0,48	2,00	0,67	0,61
6	2,77	0,26	0,25	2,20	0,97	0,88
7	2,90	0,74	0,67	2,05	0,65	0,59
8	3,36	0,50	0,46	2,36	1,30	1,17
9	2,61	0,77	0,70	1,74	0,37	0,34
10	2,98	0,64	0,58	1,68	0,19	0,19
11	3,50	1,38	1,24	2,40	1,04	0,94
12	3,45	0,73	0,66	1,87	0,41	0,38
13	2,54	0,87	0,79	1,88	0,56	0,51
14	2,64	0,31	0,29	1,96	0,43	0,39

De acordo com a Tab. 4.22, todos os cilindros usinados pelo brunimento convencional mais o flexível apresentaram uma redução significativa dos valores médios de R_t , com exceção do bloco 1, que apresentou um aumento. Comparando os resultados, verifica-se que os valores médios de R_t estão no intervalo de 1,66 μm a 4,12 μm após o brunimento convencional, com média total de 3,02 μm e, entre 1,68 μm e 2,43 μm após o brunimento convencional mais o flexível, com média total de 2,03 μm .

O desvio-padrão não apresentou uma tendência de um processo para outro. A dispersão dos valores médios de R_t após o brunimento convencional mais o flexível, apresentou tanto uma redução (bloco 3) quanto um aumento (bloco 8). Este pode ser explicado devido ao fato do parâmetro R_t 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 R_t e no entanto, não caracterizar a superfície como um todo. Assim sendo, o parâmetro R_t quando avaliado isoladamente, pode induzir a conclusões enganosas.

Conforme avaliado anteriormente, constatou-se que o perfil de rugosidade após o brunimento convencional mais o flexível apresentou uma redução da altura dos picos e a remoção destes quando presentes isoladamente. Ainda, verificou-se através da curva de *Abbott-Firestone* que após este processo, a maior parcela de material se encontrava na região inferior do perfil. Dessa maneira, pode-se afirmar que a alta variabilidade observada após o brunimento convencional mais o flexível pode ser dada pela presença dos vales isolados, assim como o aumento do valor médio de R_t para o bloco 1.

São apresentados na Fig. 4.37, os valores médios de R_t para o brunimento convencional e o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro. Com exceção do bloco 1, os valores mínimos e máximos verificados para a redução, foram de 3,1% e 56,6%, para os cilindros dos blocos 4 e 3, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 29,0%.

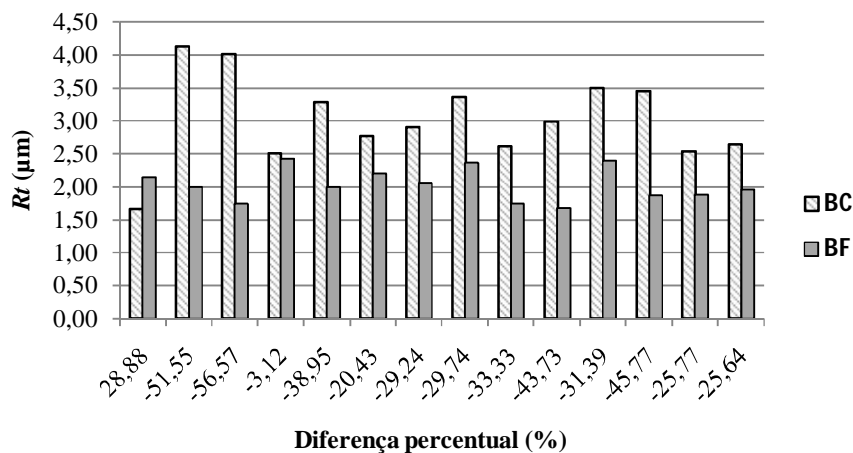


Figura 4.37 – Valores médios de R_t , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual de um processo para o outro.

A seguir são apresentados na Fig. 4.38, os valores médios de R_t , após ambas as operações de brunimento com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%).

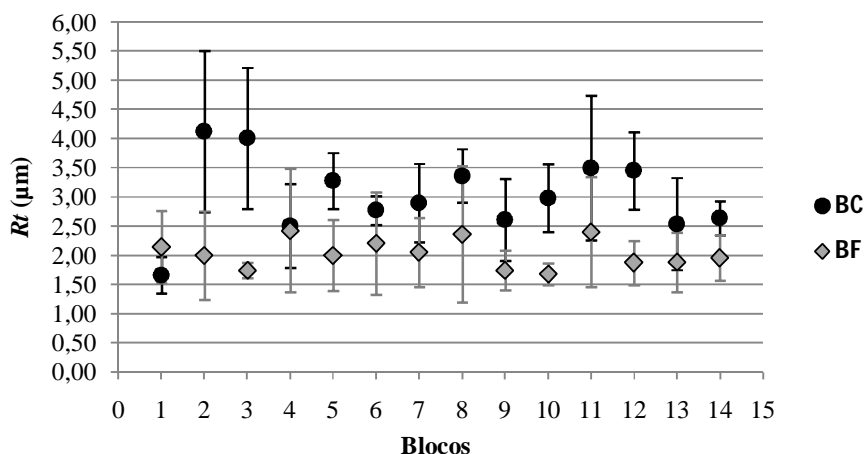


Figura 4.38 – Valores médios de R_t , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

De acordo com a Tab. 4.22, a incerteza expandida apresentou valores entre 0,25 μm e 1,38 μm após o brunimento convencional, e entre 0,13 μm e 1,17 μm após o brunimento convencional mais o flexível. Ainda, verifica-se na Fig. 4.38 que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao R_t 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 assim como verificado para o desvio padrão experimental.

Após a avaliação da incerteza, constatou-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final após os dois processos de brunimento foi à incerteza associada à variabilidade das leituras, com exceção do bloco 3 após o brunimento convencional mais o flexível, em que foi a incerteza associada a ponta do apalpador.

Juntamente com as análises feitas anteriormente, pode-se concluir que a redução de R_t após o brunimento convencional mais o flexível é caracterizada pela remoção dos picos isolados da superfície do cilindro. Esta redução é de aproximadamente 30,1%. A exceção observada para o bloco 1, não é verificada para as demais posições deste bloco, podendo ser considerado um caso isolado, também verificado para outros blocos em outras posições.

4.5.9 Avaliação do R_t na medição sem contato

São apresentados na Tab. 4.23 os valores médios de R_t , desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95,45%) e diferença percentual relativos aos blocos 15 e 9, em que, o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.23 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do R_t para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

	BC	BF	DP (%)
\bar{x} (μm)	6,26	4,37	30,20
s (μm)	1,36	0,93	31,97
U (μm)	1,22	0,83	32,34

De acordo com a Tab. 4.23, o brunimento convencional mais o flexível proporcionou uma redução de 30,2% do valor médio de R_t . Esta redução é condizente com a observada na medição com contato. No entanto, ao contrário do observado na medição com contato, os valores após este processo mostram-se mais precisos que aqueles obtidos após o brunimento convencional, apresentando uma redução de 31,9% do desvio-padrão. Consequentemente, a incerteza expandida também exibiu uma redução de 32,3%, em que, a variável que mais

influenciou na incerteza final para os dois processos, foi a variabilidade das leituras, com aproximadamente 50,4% de contribuição.

Logo, é possível concluir que os valores médios de R_t avaliados na medição sem contato apresentaram uma redução similar aos verificados na medição com contato, de aproximadamente 30,2% após o brunimento convencional mais o flexível. Este processo também apresentou valores mais precisos na medição sem contato (interferômetro).

4.5.10 Fator de assimetria do perfil de rugosidade (R_{sk})

São apresentados na Tab. 4.24 os valores médios do parâmetro R_{sk} , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.24 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do R_{sk} em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x}	s	U	\bar{x}	s	U
1	-0,38	0,28	0,26	-3,36	2,19	1,96
2	-0,38	1,13	1,02	-1,46	0,73	0,66
3	-1,40	1,23	1,10	-2,33	0,70	0,64
4	-0,37	0,36	0,34	-3,28	1,55	1,40
5	-0,45	0,45	0,42	-3,62	1,83	1,64
6	-0,37	0,66	0,60	-3,78	3,31	2,97
7	-0,47	0,43	0,40	-3,97	2,53	2,26
8	-0,21	1,41	1,27	-2,86	2,00	1,80
9	-0,48	0,47	0,43	-2,86	1,70	1,53
10	0,18	0,36	0,34	-2,57	0,60	0,54
11	-0,21	1,77	1,59	-2,86	1,20	1,08
12	-1,52	2,87	2,58	-2,86	1,08	0,97
13	-0,11	0,43	0,40	-2,16	0,67	0,61
14	-0,52	1,08	0,97	-3,64	1,76	1,58

De acordo com as Tab. 4.24, todos os valores de R_{sk} são negativos para os dois processos, com exceção do bloco 10 para o brunimento convencional, que exibiu valor de 0,18. Ainda, foi possível observar uma redução significativa para todos os valores médios após o brunimento convencional mais o flexível. Comparando os resultados, verifica-se que os valores médios de R_{sk} estão no intervalo de -1,52 a -0,11 após o brunimento convencional,

com média total de -0,48, e entre -3,97 e -1,46 após o brunimento convencional mais o flexível, com média total de -2,97.

O desvio-padrão apresentou uma tendência de aumento para a maioria dos blocos de um processo para outro. Verifica-se a redução para os blocos 2, 3, 11 e 12 e um aumento para todos os outros, indicando uma maior variabilidade dos valores após o brunimento convencional mais o flexível.

São apresentados na Fig. 4.39, os valores médios de Rsk , após os dois processos de brunimento com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%).

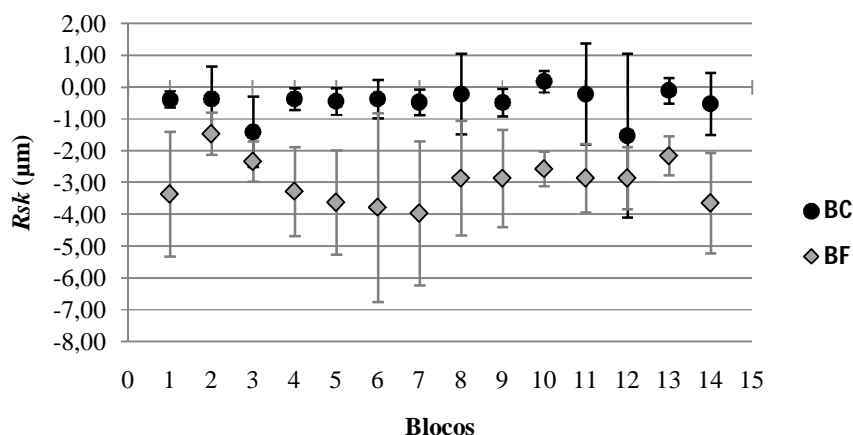


Figura 4.39 – Valores médios de Rsk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

De acordo com a Tab. 4.24, a incerteza expandida apresentou valores entre 0,26 e 2,58 após o brunimento convencional, e entre 0,54 e 2,97 após o brunimento convencional mais o flexível. Ainda, verifica-se na Fig. 4.39 que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Rsk após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas apenas para os blocos 2, 3, 6, 8, 11 e 12. Não foi observada nenhuma tendência para os valores de incerteza expandida assim como verificado para o desvio padrão experimental.

Depois de efetuada a avaliação da incerteza, constatou-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final após os dois tipos de brunimento foi à incerteza associada à variabilidade das leituras.

O valor negativo observado para Rsk aponta que as irregularidades da superfície possuem um formato da distribuição distorcida para cima, ou seja, 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 posições de medição e diferentes superfícies influenciam diretamente na variabilidade dos valores obtidos para este parâmetro.

A Figura 4.40 mostra os valores médios de Rsk para o brunimento convencional e o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro.

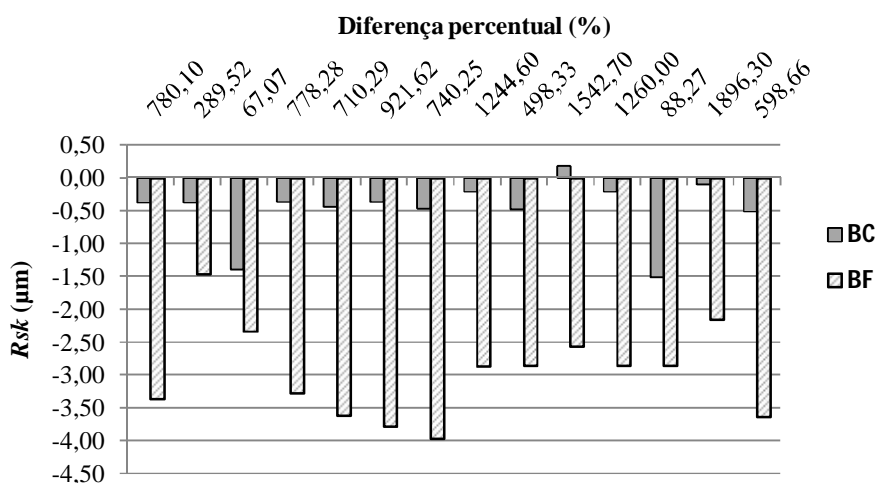


Figura 4.40 – Valores médios de Rsk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com a diferença percentual entre estes processos.

Conforme mostra a Fig. 4.40, os valores mínimos e máximos verificados para a redução na posição 1, foram de 67,1% e 1893,3%, para os cilindros dos blocos 13 e 3, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 595,0%.

Conclui-se então, que o brunimento flexível aplicado após o convencional reduziu de maneira significativa em até 1893,3% 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 platfórmica intensificando a distribuição de mais vales do que picos, evidenciado através da redução dos valores negativos de Rsk .

4.5.11. Avaliação do Rsk na medição sem contato

São apresentados na Tab. 4.25 os valores médios de Rsk , desvios-padrão (68,27%), incerteza expandida (95,45%) e diferença percentual, obtida para cada bloco, em que o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o bloco usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.25 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Rsk para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

	BC	BF	DP (%)
\bar{x}	-0,10	-0,37	284,59
s	0,08	0,31	-277,32
U	0,08	0,28	-268,19

De acordo com a Tab. 4.25, o brunimento convencional mais o flexível proporcionou uma redução de 284,6% do valor médio de Rsk . Esta redução é quase metade do valor médio da redução verificado na medição com contato. Ainda, após este processo, o desvio-padrão apresentou um aumento significativo de 277,3%. Por fim, a incerteza expandida, mostrou a mesma tendência do desvio-padrão, com um aumento de 268,2%, sendo a variabilidade das leituras, a variável que mais influenciou na incerteza final para os dois processos, com aproximadamente 50,6% de contribuição.

Portanto conclui-se, que os valores médios obtidos na medição sem contato indicaram uma redução após o brunimento convencional mais o flexível, com maior dispersão dos valores obtidos e consequentemente da incerteza expandida, também observada para alguns cilindros avaliados na medição com contato.

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

São apresentados na Tab. 4.26 os valores médios do parâmetro Rku , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e pelo convencional mais o flexível.

De acordo com a Tab. 4.26, os valores médios de Rku apresentaram um aumento após o brunimento convencional mais o flexível, com exceção do bloco 3. Verifica-se que os valores médios de Rku estão no intervalo de 4,21 a 20,92 após o brunimento convencional, com

média total de 8,77 e entre 9,15 e 30,13 após o brunimento convencional mais o flexível, com média total de 21,33.

O valor do desvio-padrão aumentou para a maioria dos blocos após o brunimento convencional mais o flexível. Isto indica que houve uma maior repetibilidade dos valores obtidos após o brunimento convencional, ou seja, uma melhor precisão.

Tabela 4.26 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do Rku em cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF).

Bloco	BC			BF		
	\bar{x}	s	U	\bar{x}	s	U
1	4,21	0,93	0,84	30,13	34,09	30,46
2	6,89	4,26	3,81	9,15	3,83	3,44
3	15,10	8,66	7,78	12,56	6,34	5,68
4	6,34	2,91	2,60	22,05	13,89	12,44
5	5,81	1,26	1,14	25,54	23,11	20,68
6	7,00	1,86	1,68	27,81	32,69	29,28
7	5,77	1,20	1,08	33,08	36,85	32,90
8	10,82	5,21	4,65	20,58	22,50	20,11
9	5,95	2,88	2,59	20,04	17,61	15,66
10	5,79	1,26	1,14	14,99	5,10	4,55
11	14,56	11,18	10,00	17,12	8,18	7,33
12	20,92	34,98	31,33	20,95	9,79	8,79
13	5,44	1,45	1,30	15,42	8,58	7,67
14	8,15	3,64	3,27	29,17	21,79	19,49

São apresentados na Fig. 4.41, os valores médios de Rku , após o brunimento convencional e flexível com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%).

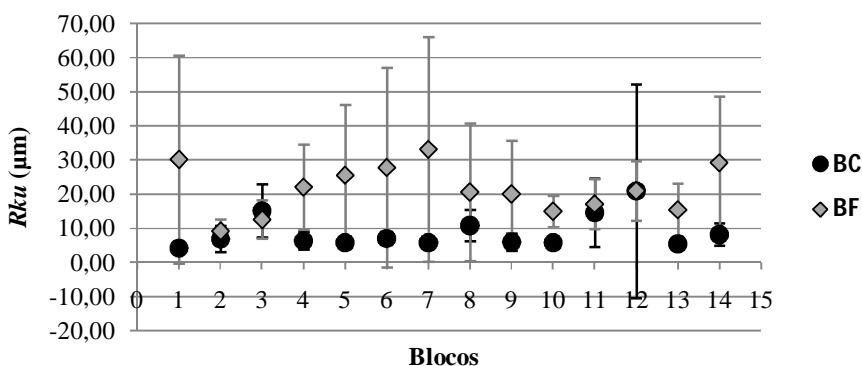


Figura 4.41 – Valores médios de Rku , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

De acordo com a Tab. 4.26, a incerteza expandida apresentou valores entre 0,84 e 31,33 após o brunimento convencional, e entre 3,44 e 32,90 após o brunimento convencional mais o flexível. Ainda, verifica-se na Fig. 4.41 que as faixas de valores da incerteza expandida associada ao Rku após ambos os processos de brunimento, encontram-se parcialmente superpostas para todos os blocos, com exceção do bloco 10. Assim como verificado para o desvio padrão experimental, a incerteza expandida apresentou valores maiores após o brunimento convencional mais o flexível.

Para a avaliação da incerteza, constatou-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final após os dois processos foi à incerteza associada à variabilidade das leituras.

A Figura 4.42 apresenta os valores médios de Rku para o brunimento convencional e o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro.

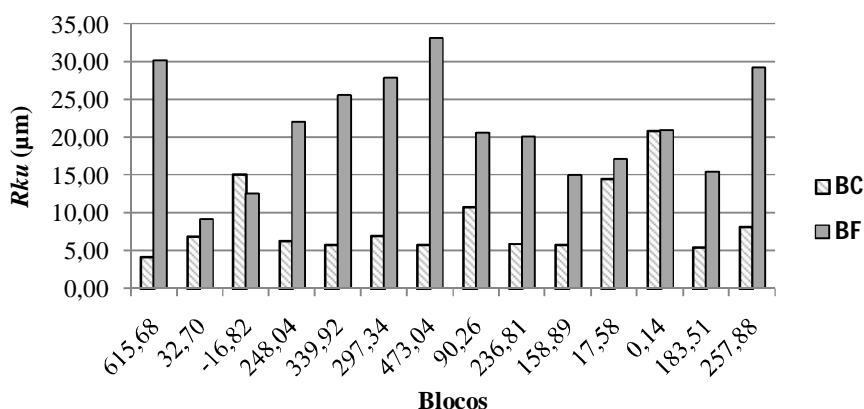


Figura 4.42 – Valores médios de Rku , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conforme mostra a Fig. 4.42, os valores mínimos e máximos verificados para a redução, foram de 0,1% e 615,7%, para os cilindros dos blocos 12 e 1, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 209,6%.

Os valores de Rku superiores a 3, indicam que as irregularidades superficiais são mais estreitas, ou seja, o afinamento dos picos ocorre através da remoção de material da parte superior do perfil, após o brunimento convencional mais o flexível, característica verificada na análise da curva de *Abbott-Firestone*.

Portanto, é possível concluir que o brunimento flexível efetuado após o brunimento convencional provocou um aumento dos valores de Rku , proporcionando à superfície do

cilindro picos mais estreitos que os observados somente pela usinagem do brunimento convencional. O desgaste imediato destas irregularidades proporciona a remoção dos picos, auxiliando na redução do atrito, como observado anteriormente para o parâmetro Rsk . No entanto é necessário ressaltar que o parâmetro Rku não considera a magnitude geral da superfície, somente sua forma ou quão estreitos são os picos e os vales.

4.5.13 Avaliação do Rku na medição sem contato

São apresentados na Tab. 4.27 os valores médios de Rku , desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95,45%) e diferença percentual, obtida para cada bloco, em que o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.27 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) do Rku para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

	BC	BF	DP (%)
\bar{x}	3,39	4,71	-39,20
s	0,26	0,91	-257,13
U	0,23	0,82	-255,70

De acordo com a Tab. 4.27, o brunimento convencional mais o flexível proporcionou um aumento de 39,2% do valor médio de Rku . Ainda, após este processo, o desvio-padrão apresentou um aumento significativo de 257,1%, também verificado na medição com contato. Por fim, a incerteza expandida mostrou a mesma tendência do desvio-padrão, com um aumento de 255,7%, sendo a variabilidade das leituras, a variável que mais influenciou na incerteza final para os dois processos, com aproximadamente 50,9% de contribuição.

Portanto conclui-se, que os valores médios de Rku apresentaram um aumento após o brunimento convencional mais o flexível, bem como o desvio-padrão e a incerteza expandida, concordando com os resultados obtidos na medição com contato.

4.5.14 Rugosidade do núcleo do perfil (Rk)

São apresentados na Tab. 4.28 os valores médios do parâmetro Rk , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Tabela 4.28 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do Rk em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,51	0,03	0,18	0,31	0,09	0,11
2	0,94	0,49	0,45	0,39	0,06	0,10
3	0,74	0,08	0,11	0,35	0,11	0,13
4	0,54	0,02	0,08	0,31	0,08	0,11
5	0,71	0,20	0,20	0,26	0,03	0,08
6	0,53	0,06	0,10	0,30	0,05	0,09
7	0,68	0,17	0,17	0,29	0,04	0,09
8	0,65	0,11	0,13	0,41	0,12	0,13
9	0,64	0,22	0,22	0,33	0,18	0,18
10	0,68	0,14	0,15	0,25	0,05	0,09
11	0,60	0,18	0,18	0,35	0,12	0,13
12	0,71	0,30	0,28	0,30	0,15	0,15
13	0,51	0,04	0,09	0,34	0,07	0,10
14	0,60	0,11	0,12	0,30	0,10	0,12

Verifica-se na Tab. 4.28, uma redução significativa dos valores médios de Rk para todos os blocos após o brunimento convencional mais o flexível. Após este processo, os valores médios se encontram no intervalo de 0,25 μm a 0,41 μm , com média total de 0,32 μm , enquanto que para o brunimento convencional observam-se valores entre 0,51 μm e 0,94 μm , com média total de 0,65 μm . Por sua vez, o desvio-padrão não apresentou uma tendência definida de um processo para outro.

De acordo com a Tab. 4.28, a incerteza expandida apresentou valores máximos de 0,45 μm e de 0,18 μm após o brunimento convencional e após o convencional mais o flexível, respectivamente. Constata-se na Fig. 4.43 que a maioria dos valores de incerteza associada à Rk após o brunimento convencional mais o flexível apresentou uma redução.

Depois de efetuada a avaliação da incerteza após o brunimento convencional, verificou-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final para os blocos 1, 3, 4, 6, 8 e 13 foi a incerteza associada ao raio da ponta do apalpador, enquanto que para os demais blocos verificou-se à incerteza associada à variabilidade das leituras. Já para a avaliação da incerteza após o brunimento convencional mais o flexível, constatou-se como sendo a variável que mais contribuiu para os blocos 9 e 12, a variável associada a variabilidade das leituras e para os demais blocos a incerteza associada ao raio da ponta do apalpador.

Na Figura 4.43 são apresentados os valores médios de Rk para os dois processos de brunimento com barra de erros associada à incerteza expandida (95,45 %).

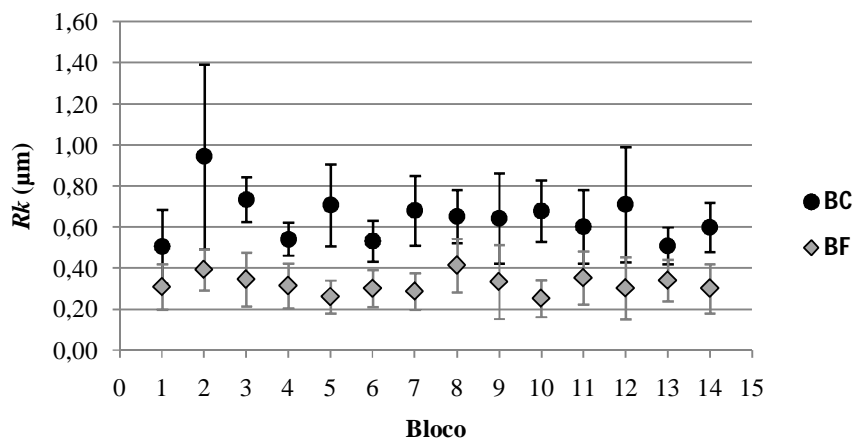


Figura 4.43 – Valores médios de Rk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

A Figura 4.44 mostra os valores médios de Rk para o brunimento convencional e para o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro.

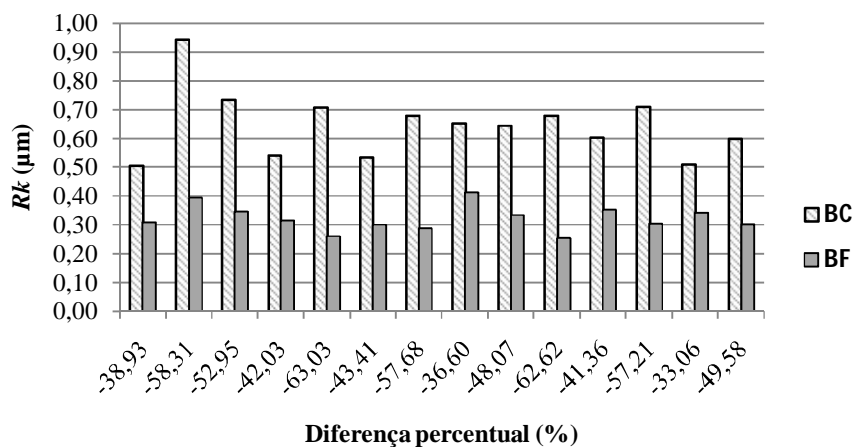


Figura 4.44 – Valores médios de Rk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conforme mostra a Fig. 4.44, os valores mínimos e máximos verificados para a redução, foram de 33,1% e 63,0%, para os cilindros dos blocos 13 e 5, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 48,9%.

Assim, é possível concluir que os valores médios de Rk sofreram uma redução média de aproximadamente 49,0% após o brunimento convencional mais o flexível. Segundo Stout (2000), baixos valores de Rk indicam uma alta resistência mecânica e alta capacidade de suportar cargas em operações de contato. Portanto o brunimento flexível aplicado após o brunimento convencional atenuou estas características na superfície do cilindro.

4.5.15 Região de pico (Rpk)

São apresentados na Tab. 4.29 os valores médios do parâmetro Rpk , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e pelo convencional mais o flexível.

Tabela 4.29 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do Rpk em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Bloco	Brunimento Convencional			Brunimento Flexível		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,20	0,03	0,08	0,11	0,05	0,09
2	0,37	0,13	0,14	0,13	0,03	0,08
3	0,44	0,13	0,14	0,10	0,01	0,08
4	0,33	0,12	0,13	0,11	0,03	0,08
5	0,37	0,12	0,13	0,08	0,02	0,08
6	0,26	0,07	0,10	0,10	0,03	0,08
7	0,36	0,11	0,13	0,10	0,03	0,08
8	0,38	0,11	0,13	0,12	0,02	0,08
9	0,27	0,10	0,12	0,10	0,03	0,08
10	0,37	0,14	0,15	0,11	0,02	0,08
11	0,44	0,27	0,25	0,11	0,05	0,09
12	0,38	0,15	0,15	0,10	0,04	0,09
13	0,24	0,05	0,09	0,09	0,02	0,08
14	0,29	0,09	0,11	0,10	0,03	0,08

Verifica-se na Tab. 4.29, uma redução significativa dos valores médios de Rpk para todos os blocos após o brunimento convencional mais o flexível. Após este processo, os valores médios se encontram no intervalo de 0,08 μm a 0,13 μm , com média total de 0,10 μm , enquanto que para o brunimento convencional observam-se valores entre 0,20 μm e 0,44 μm , com média total de 0,34 μm .

O desvio-padrão também apresentou uma redução significativa após o brunimento convencional mais o flexível, apresentando valores entre 0,01 μm e 0,05 μm . Já após o brunimento convencional, constata-se valores no intervalo de 0,03 μm a 0,27 μm . Assim, pode-se afirmar que os valores obtidos após o brunimento convencional mais o flexível são mais precisos quando comparados aos obtidos pelo brunimento convencional.

A Figura 4.45 apresenta os valores médios de Rpk para os dois processos de brunimento com barra de erros associada à incerteza expandida (95,45%).

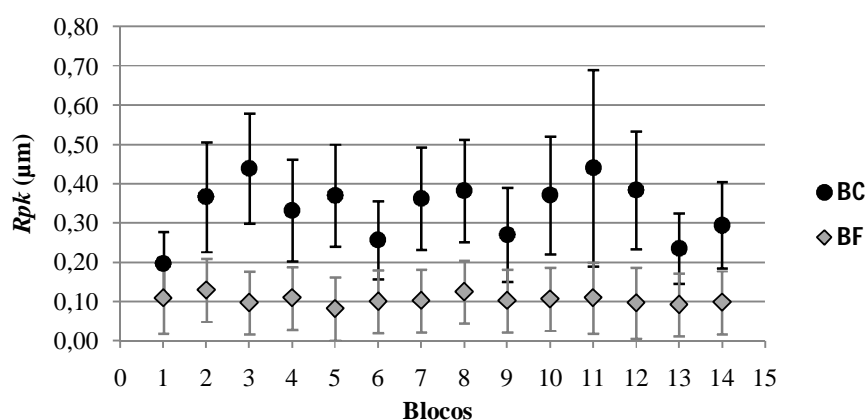


Figura 4.45 – Valores médios de Rpk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

De acordo com a Tab. 4.29, a incerteza expandida apresentou valores máximos de 0,25 μm após o brunimento convencional e de 0,09 μm após o brunimento convencional mais o flexível, indicando que houve uma redução significativa destes, também verificada através da Fig. 4.45.

A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à ponta do apalpador, para todos os blocos usinados pelo brunimento convencional mais o flexível e para a maioria dos blocos usinados pelo brunimento convencional, com exceção dos blocos 2, 10, 11 e 12, em que a variável que mais contribuiu foi a variabilidade das leituras.

A Figura 4.46 exibe os valores médios de Rpk para o brunimento convencional e o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro. Constata-se que os valores mínimos e máximos verificados para a redução, foram de 45,0% e 78,1%, para os cilindros dos blocos 1 e 5, respectivamente. Ainda, a diferença percentual média foi de 67,6%.

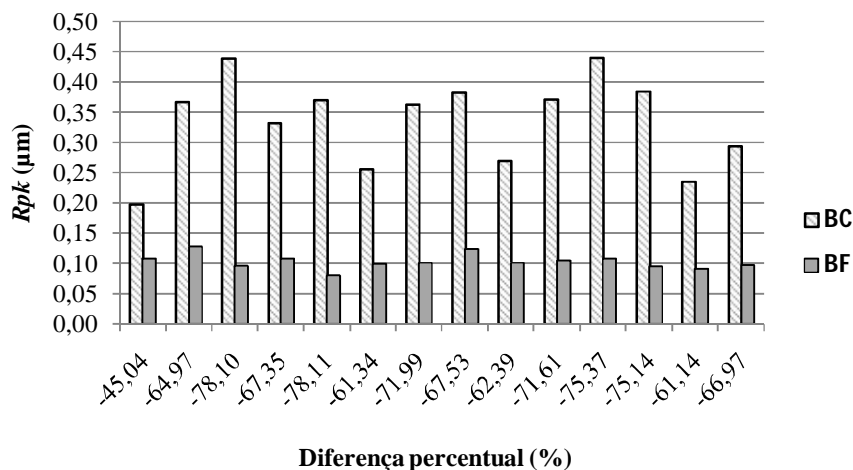


Figura 4.46 – Valores médios de Rpk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conclui-se que os valores de Rpk obtidos após o brunimento convencional mais o flexível sofreram uma redução média de 67,6%, apresentando uma maior precisão comparada ao brunimento convencional. A redução dos valores de Rpk indica uma melhoria das propriedades de amaciamento da superfície do cilindro.

4.5.16. Região de vale (Rvk)

São apresentados na Tab. 4.30 os valores médios do parâmetro Rvk , desvios-padrão (68,27%) e incertezas expandidas (95,45%) obtidas durante a simulação de MC para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e convencional mais o flexível.

Verifica-se na Tab. 4.30 que os valores de Rvk não apresentaram uma tendência após o brunimento convencional mais o flexível. Após este processo, os valores médios se encontram no intervalo de 0,30 μm a 0,65 μm , enquanto que para o brunimento convencional observam-se valores entre 0,31 μm e 0,58 μm . Ainda, o valor médio total obtido para o brunimento convencional e para o convencional mais o flexível foi de 0,43 μm e 0,42 μm respectivamente. O desvio-padrão não apresentou uma tendência dos valores de um processo para outro.

Tabela 4.30 – Valores obtidos para média (\bar{x}), desvio-padrão (s) e incerteza expandida (U) do Rvk em cilindros usinados pelos brunimentos convencional e convencional mais o flexível.

Bloco	BC			BF		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
1	0,31	0,07	0,10	0,40	0,14	0,15
2	0,65	0,21	0,21	0,35	0,11	0,13
3	0,55	0,09	0,11	0,44	0,11	0,12
4	0,34	0,08	0,10	0,52	0,27	0,26
5	0,42	0,16	0,17	0,43	0,21	0,21
6	0,42	0,08	0,11	0,51	0,29	0,28
7	0,49	0,18	0,18	0,43	0,13	0,14
8	0,49	0,13	0,14	0,50	0,21	0,21
9	0,40	0,20	0,20	0,36	0,16	0,17
10	0,38	0,12	0,13	0,38	0,14	0,15
11	0,47	0,21	0,20	0,58	0,33	0,31
12	0,42	0,23	0,22	0,37	0,17	0,17
13	0,30	0,10	0,12	0,31	0,14	0,15
14	0,44	0,15	0,16	0,36	0,10	0,12

São apresentados na Fig. 4.47, os valores médios de Rvk após os dois processos de brunimento com barra de erros relativa à incerteza expandida (95,45%).

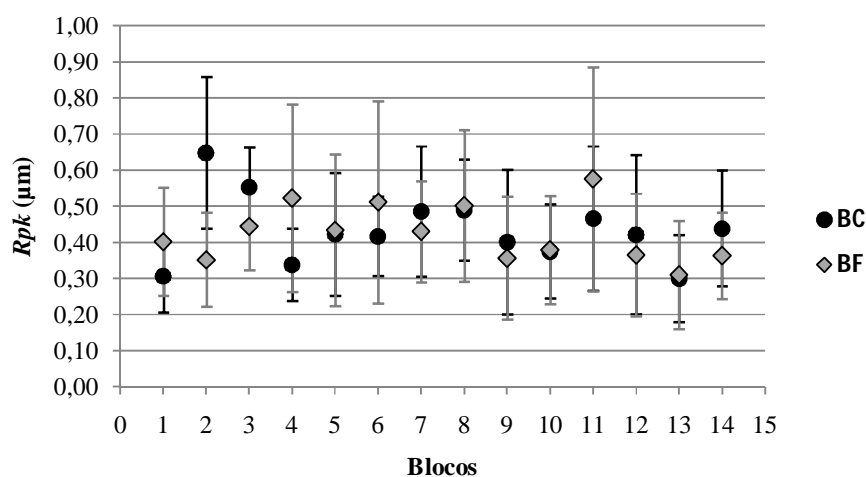


Figura 4.47 – Valores médios de Rvk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com barra de erros associado à incerteza expandida.

De acordo com a Tab. 4.30, a incerteza expandida apresentou valores entre 0,10 μm e 0,22 μm após o brunimento convencional, e entre 0,12 μm e 0,31 μm após o brunimento

convencional mais o flexível. Verifica-se que para a maioria dos blocos usinados por este processo, houve um aumento do valor da incerteza expandida. Ainda, na Fig. 4.47, observa-se que as faixas de valores associadas à Rvk após os dois processos, encontram-se parcialmente superpostas para todos os blocos.

Durante a avaliação da incerteza, constatou-se que a incerteza associada à ponta do apalpador, foi a variável que mais contribuiu para a incerteza final dos blocos 1, 3, 4, 6, 10 e 13 após o brunimento convencional, e para os blocos 2, 3 e 14 após o brunimento convencional mais o flexível. Para o resto dos blocos usinados pelos dois processos, verificou-se a incerteza associada à variabilidade dos valores indicados.

A Figura 4.48 mostra os valores médios de Rvk para o brunimento convencional e para o convencional mais o flexível com a diferença percentual de um processo para o outro.

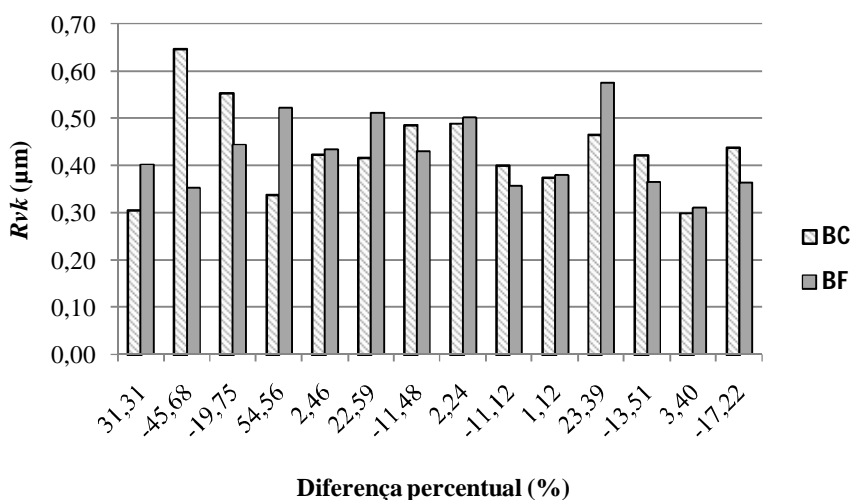


Figura 4.48 – Valores médios de Rvk , dos cilindros usinados pelos brunimentos convencional (BC) e convencional mais o flexível (BF) com diferença percentual entre os processos.

Conforme mostra a Fig. 4.48, o valor máximo verificado para a redução e o aumento do valor de Rvk , foi de 45,7% e 54,6%, para os cilindros dos blocos 2 e 4, respectivamente. Ainda, a redução média total foi de 19,8%, enquanto o aumento médio total foi de 17,6%.

Desta forma, conclui-se que os valores de Rvk obtidos após o brunimento convencional mais o flexível não apresentaram uma tendência definida. Assim, como os valores médios, o desvio-padrão não apresentou uma tendência. Já a incerteza expandida, exibiu um aumento de 64,0% dos blocos usinados pelo brunimento convencional mais o flexível. O aumento dos

valores de Rvk indica uma melhoria das propriedades da superfície para retenção de lubrificantes, enquanto a redução, o inverso.

4.5.17 Avaliação dos parâmetros da família Rk na medição sem contato

São apresentados na Tab. 4.31 os valores médios, desvios-padrão (68,27%), incertezas expandidas (95,45%) e diferença percentual relativos aos blocos 9 e 15, obtidos na medição sem contato para os parâmetros Rk , Rpk e Rvk , em que o bloco 15 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional, enquanto que o bloco 9 representa o cilindro usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Tabela 4.31 - Valores obtidos na medição sem contato, para média (\bar{x}), desvio-padrão (s), incerteza expandida (U) e diferença percentual (DP) dos parâmetros Rk , Rpk e Rvk para o cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional (BC) e para o cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível (BF).

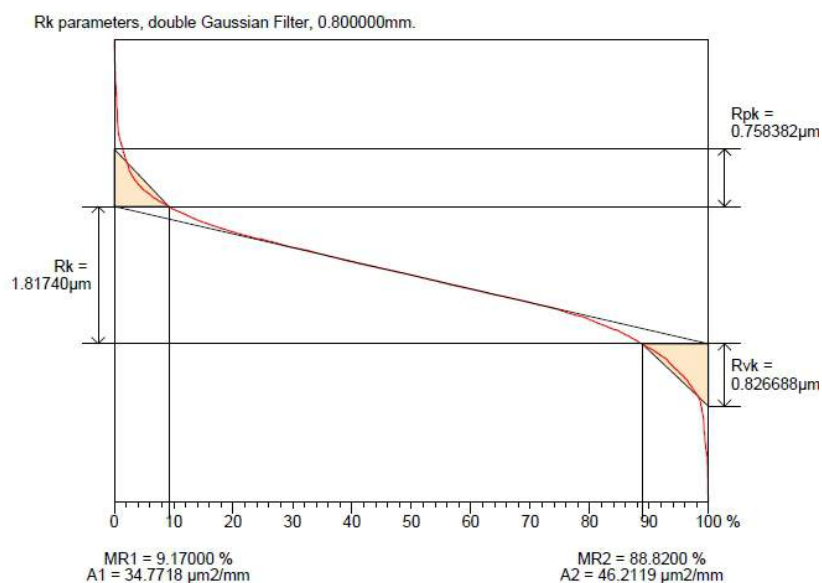
	Rk			Rpk			Rvk		
	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	U (μm)
BC	1,95	0,25	0,22	0,73	0,09	0,08	0,85	0,16	0,14
BF	1,13	0,21	0,19	0,54	0,06	0,05	0,79	0,18	0,16
DP (%)	-41,96	-15,90	-16,42	-25,83	-35,44	-33,54	-6,77	9,96	9,58

Conforme mostra a Tab. 4.31, após o brunimento convencional mais o flexível, o parâmetro Rk apresentou uma redução de 41,9% para o valor médio, condizente com o valor observado na medição com contato. Ainda, após este processo, o desvio-padrão exibiu uma pequena redução, de 15,9%. Seguindo a mesma tendência, a incerteza expandida também apresentou uma redução de 16,4%, como observado para a maioria dos blocos após o brunimento flexível.

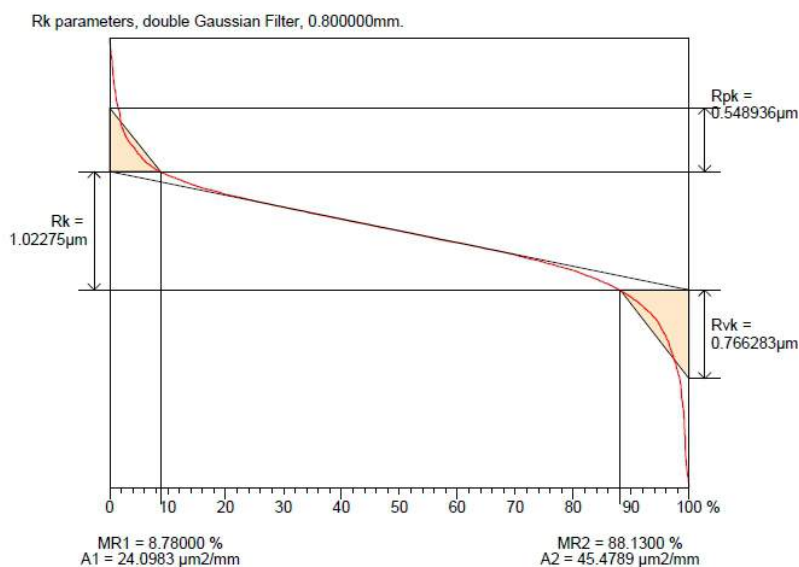
Analisando o parâmetro Rpk , constata-se que seu valor médio sofreu uma redução de 25,8%, representando um pouco mais da metade do valor observado na medição com contato. Verifica-se para o desvio-padrão uma redução de 35,4% e para a incerteza expandida uma redução de 33,5%.

Já o parâmetro Rvk , apresentou uma redução do valor médio após o brunimento convencional mais o flexível de 6,8%, condizente com a redução observada para os valores deste parâmetro obtido na medição com contato. Ainda, verifica-se um aumento de do desvio-padrão de 9,9% e para a incerteza expandida de 9,6%.

A fim de compreender a representação destes valores na curva de *Abbott-Firestone*, é apresentada a seguir a curva obtida para o bloco 15 (Fig. 4.49a), usinado pelo brunimento convencional e para o bloco 9 (Fig.4.49b), usinado pelo brunimento convencional mais o flexível, referente à leitura 1.



(a)



(b)

Figura 4.49 – Parâmetros da família *Rk* obtidos a partir da curva de *Abbott-Firestone* para a leitura 1 (a) do cilindro do bloco 15, usinado pelo brunimento convencional e (b) do cilindro do bloco 9, usinado pelo brunimento convencional mais o flexível.

Na Figura 4.49, 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 $A1$ e o $Mr1$ sofreram uma redução significativa após o brunimento convencional mais o flexível, enquanto que a área $A2$ e o $Mr2$ não apresentaram uma variação relevante.

Portanto, é possível concluir que os valores médios obtidos na medição sem contato, relativos aos parâmetros, Rk e Rpk apresentaram uma redução após o brunimento convencional mais o flexível assim como os valores obtidos na medição com contato. A dispersão destes valores também foi menor, bem como a incerteza expandida.

Em relação ao parâmetro Rvk , pode-se afirmar que o brunimento convencional mais o flexível tende a proporcionar um aumento deste parâmetro, verificando que, apesar dos valores de Rvk não apresentarem uma tendência definida, metade destes obtidos na medição com contato sofreram um aumento. Ainda, de acordo com os resultados obtidos para Rsk , a redução do valor negativo deste parâmetro, caracteriza a formação de sulcos que servem como depósito para lubrificantes. Constata-se também através do perfil de rugosidade, que após o brunimento convencional mais o flexível os vales permaneceram inalterados, bem como a curva de *Abbott-Firestone* mostra que a maior parcela de material está concentrado na parte inferior do perfil de rugosidade. Logo, todos estes aspectos induzem a afirmação de que o brunimento flexível aplicado após o convencional tende a aumentar os valores de Rvk , melhorando suas propriedades de reter lubrificantes em sua superfície.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Ao finalizar o presente trabalho, conclui-se segundo a avaliação dimensional e geométrica efetuada, que é recomendada, após a usinagem de brunimento convencional em cilindros de blocos de compressores herméticos, a realização do brunimento flexível, pois esta operação apresenta:

- Remoção de material em pequenas quantidades provocando pouca variação dimensional;
- Redução significativa dos valores dos desvios de circularidade, com média percentual de 77% e melhorias no formato do perfil. Valores pequenos de desvios-padrão associados à circularidade, indicando elevada precisão;
- Redução significativa dos valores de incerteza expandida (95%) de até 9 vezes em relação ao brunimento convencional, o que denota uma maior confiabilidade;
- 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;
- Pouca variação do desvio de cilindridade. Cabe destacar que embora durante a medição fosse observado um aumento nos valores deste desvio após o brunimento flexível, muito provavelmente a causa disto está na influência do desbalanceamento da

peça durante a medição e não no processo de usinagem. Verifica-se que os resultados obtidos por este processo de medição apresentaram altos valores de incerteza expandida, tanto pelo brunimento convencional quanto pelo flexível, indicando que uma baixa confiabilidade dos valores de desvio de cilindridade obtidos.

CAPÍTULO VI

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

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

1. Avaliar a qualidade dimensional e geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível variando a rotação da ferramenta e/ou o número de golpes.
2. Avaliar a qualidade dimensional e geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível com diferentes granulometrias do material abrasivo da ferramenta de corte.
3. Avaliar a qualidade dimensional e geométrica dos cilindros, usinados pelo brunimento flexível com diferentes fluidos de corte.
4. Efetuar a avaliação dimensional do cilindro após o brunimento convencional e flexível utilizando um instrumento de medição com resolução de no mínimo 0,001 mm.
5. Efetuar a avaliação da rugosidade após os dois processos de brunimento utilizando um rugosímetro com ponta do apalpador com menor raio.
6. Efetuar a avaliação do desvio de cilindricidade por meio de diferentes instrumentos de medição, a fim de estudar a influência da incerteza de medição nos valores do desvio de cilindricidade.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARON, T. *et al.* "Grinding, Honing and Lapping". **ASM Handbook - Machining**. ASM International, 1995.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 1977. 295p.
- ANDRETTA, C. **Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas: São Paulo, 2001.
- ARENCIBIA R. V. FRANCO, S. D., DE MORAES, J. O. **Relatório de medição dos penetradores**. 2011. 16p.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS NBR ISO 3274, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Características nominais de instrumentos por contato (pontas de apalpação)**. 2008. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Set. 2002. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4288, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. 2008. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 6158, **Sistema de Tolerâncias e Ajustes**. 1995. 79p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 6409, **Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. 1997. 19p.
- BARTON, K.; HAASIS, G. Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing. **Technical publication of SME** – Society of Manufacturing Engineers, 1993, 37p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 101 - **Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method**. 2008. 90p.
- BRUNITEC. Disponível em :<www.brunitec.com.br> Acesso em: 23 jun. 2014.
- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**. Volume One. Sharter 2 Surface roughness analysis and measurement techniques, 2002, pp. 49-120.
- BYRNES, F.; FISCHER, H. Honing: An eye to the Future, International Honing Clinic. **Technical Paper MF92-128**, SME – Society of Manufacturing Engineers, 1992, 15p.
- CARVALHO, V. C. **Análise do brunimento de cilindro de blocos de motores em ferro fundido de grafita compacta (CGI)**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, 2007, 151p.
- 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 purê & applied physics, V. 49, 2011, pp. 335-339.
- 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, 2002, 21.5: 395-408.
- FERREIRA, M. E. B. C.; MAGALHÃES, L. L. **Projeto Mecânico de Equipamento para Brunimento de Camisas de Cilindro**. CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2009. 123p.
- FLORES, G. **Honen - Fein Bearbeitung von Bohrungen**. Disponível em: <<http://www.hs-esslingen.de/de/nc/mitarbeiter/gerhard-flores/vorlesung-sonderverfahren-der-fertigungstechnik.html?cid=40158&did=14868&sechash=2c4c44be>>. Acesso em: 6 mai. 2014

- GEHRING. **Special Machines**. Disponível em: < <http://www.gehring.de/en/products/honing-machines/special-machines/>>. Acesso em: 25 jun. 2014.
- HAITJEMA, H. Uncertainty analysis of roughness standard calibration using stylus instruments. **Precision Engineering**, v. 22, p. 110-119, 1998.
- 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 13, 2005, pp. 232–235.
- 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, 95p.
- ISO TAG 4/WG 3, 2008, **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. Geneva Switzerland, 131p.
- 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 Intern**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009. 65p.
- JUNQUEIRA, KLEBER DE C. E PAMPLONA, EDSON DE O. **Utilização da Simulação de Monte Carlo em Estudo de Viabilidade Econômica para a Instalação de um Conjunto de Rebeneficiamento de Café na Cocarive**. XXII Encontro Nacional de engenharia de Produção, outubro de 2002, Curitiba, PR. Brasil.
- 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**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.


- LYNCEE, TEC. **Roughness measurements with Digital Holographic Microscopy**. Disponível em <<http://www.lynceetec.com/downloads/>> Acesso em: 27 jun. 2014.
- MUMERY, L. **Surface Texture the Handbook**. Hommelwerke GmbH. 1992.106 p.
- NAGEL. **Precidor Tools**. Disponível em :<<http://www.nagel.com/en/honing-tools/precidor-tools>> Acesso em: 06 maio 2014.
- NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo. Brasil. 1994. 119p.
- 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.
- POON, C.Y.; BHUSHAN, B. **Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler**. Wear 190, 1995, pp. 76-88.
- RHEE, H. G.; LEE, Y. W.; LEE, I. W.; VORBURGER, T. V. **Roughness Measurement Performance Obtained with Optical Interferometry and Stylus Method**. Journal of the Optical Society of Korea, V.10, N.1, 2006. pp. 48-54.
- ROMI. **Centros de Usinagem Verticais**, Disponível em: <http://romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/Catalogos/Portugues/cat_discovery_po_ai.pdf> Acesso em: 23 jun. 2014.
- 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.
- SMITH, G. T. **Industrial metrology: Surfaces and Roundness**. London: Springer, 2002. 352p.
- 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. pp. 211-223.
- SOUZA, C. C.; ARENCIBIA, R. V.; COSTA, H. L. **A contribution to the measurement of circularity and cylindricity deviations**. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal, 2011.10p.
- STOECKER, W. F.; SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 371p.

- STOUT, K. J. (2000). **Developments of methods for the characterization of roughness in three dimensions**. Penton Press, London, 200.
- TAYLOR HOBSON. **Surface Finish Metrology**. 2003. 329 slides.
- VERTEC. **Manual Flex-Hone**, Disponível em: <www.vertec.com.br/Produtos/flex_hone.pdf>
Acesso em: 27 ag. 2013.
- VISQUE, E. J. **Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Brunimento**. 1998. 77p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.
- VORBURGER, T. V.; RHEE, H. G.; RENEGAR, T. B.; SONG, J. F.; ZHENG, A. **International journal advances manufacturing technology**, V. 33. 2007, 100p.
- ZAHWI, S.; KOURA, M.; MEKAWI, A. **Factors influencing uncertainty evaluation for surface roughness measurements**. In Proceedings XVII IMEKO World Congress, June 22 – 27, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Certificado de Calibração do Anel Padrão

APÊNDICE 2 - Certificado de Calibração do Micrômetro Interno

	Data: 06/08/14	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerencia de Qualidade	Pagina: 1 de 2
Certificado de Calibração: 002/14		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: Laboratório de Metrologia Dimensional

Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Uberlândia - MG

Telefone: (34) 3239 – 4584

2. Objeto calibrado:

Anel Liso Cilíndrico

Fabricante: Mitutoyo

Diâmetro Nominal: 22,021 mm

3. Instrumento utilizado na calibração:

Máquina Universal de Medir Comprimentos

Tipo: Analógico

Fabricante: Carl Zeiss Jena

Faixa de medição: 100 mm

Resolução: 0,1 μ m

Identificação: U 32 743 251

Certificado de calibração nº CCA-/0009/2012 LMD

4. Procedimento de medição

Inicialmente foi realizada a limpeza tanto do instrumento quanto do anel padrão. Através de uma inspeção visual foi notada oxidações na superfície do anel padrão. Foram efetuadas 10 medições do diâmetro do anel padrão.

5. Resultado da Calibração

Abaixo são apresentados os valores obtidos para as 10 medições, seguido da incerteza de medição expandida (U).

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

D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)
20,0200	20,0224	20,0220	20,0222	20,0232	20,0206	20,0228	20,0230	20,0214
D10 (mm)	\bar{x} (mm)	U (mm)						
20,0224	20,0220	0,0007						

6. Incerteza de medição:

A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência $k = 2,20$, para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

7. Nota:

Temperatura ambiente $(20,0 \pm 1)^\circ\text{C}$


Data da calibração: 06 de agosto de 2014

Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

Karina Alves Fernandes
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

	Data: 24/04/14	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerencia de Qualidade	Pagina: 1 de 2
Certificado de Calibração: 001/14		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: Laboratório de Metrologia Dimensional

Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Uberlândia - MG

Telefone: (34) 3239 – 4584

2. Objeto calibrado:

Micrômetro para medir internos

Fabricante: Mitutoyo

Resolução: 0,005 mm

Faixa Nominal: 0 – 25 mm

Serial: 80746

Identificação: Patrimônio UFU nº 04 03 36

Ultima Calibração: Não Consta

3. Padrão utilizado na calibração:

Calibrador Anel Liso Cilíndrico

Fabricante: Mitutoyo

Certificado nº 002/14 – LMD

Diâmetro convencional : 20,0220 mm

4. Procedimento de medição

Inicialmente foi realizada a limpeza tanto do instrumento quanto do anel padrão. Através de uma inspeção visual não foi notada nenhuma anormalidade. Foram efetuadas 10 medições do diâmetro do anel 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

5. Resultado da Calibração

Abaixo são apresentados os valores obtidos para as 10 medições, seguido da incerteza de medição expandida (U).

D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	D7 (mm)	D8 (mm)	D9 (mm)	D10 (mm)
20,035	20,030	20,035	20,035	20,035	20,035	20,035	20,035	20,030	20,035
								\bar{x} (mm)	s (mm)
								20,034	0,002

6. Incerteza de medição:

A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência $k = 1,96$, para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

7. Nota:

Temperatura ambiente ($20,0 \pm 1$)°C

Data da calibração: 24 de Abril de 2014

Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

Karina Alves Fernandes
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

ANEXOS

ANEXO 1 - Certificado de Calibração da Máquina de Medir a Três Coordenadas

ANEXO 2– Certificado de Calibração do Termo-higrômetro

ANEXO 3– Certificado de Calibração da Máquina Universal de Medir Comprimentos

ANEXO 4 - Certificado de Calibração da Máquina de Medir Desvios de Forma

ANEXO 5 - Certificado de Calibração do Rugosímetro

ANEXO 6 - Certificado de Calibração do Interferômetro

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0031

Cliente : FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Endereço : Avenida Amazonas, 2121 - Campus Umuarama - Uberlândia - MG. - CEP - 38400-902

Ordem de Serviço : 035.766/001

I. Objeto Calibrado :

Máquina de Medição por Coordenadas

Fabricante : Mitutoyo

MMC Modelo : BRM-443

No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65

Identif. do Cliente: N.C

Faixa Nominal : 400 x 400 x 300 mm

Contador Digital / Controlador

Modelo : N.C

No Série : N.C

Resolução : 0,0005 mm

Cabeçote

Modelo : MH20i

No Série : 7F8912

Probe

Modelo : TP20

No Série : 6T4567

Rack

Modelo : N.C

No Série : N.C

Programa de Medição

Programa : Geopak Win

Versão : 3.0R16

Dongle No. : 10-10336238



II. Notas:

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3.
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: $(20,5 \pm 0,5) ^\circ C$
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado

No Série : 500034

Certificado No : 04980/13

Emitido em : 14/05/2013

Validade : 11/2013

Termômetro

No Série : T1FA016

Certificado No : LV22179/12

Emitido em : 18/06/2012

Validade : 06/2014

Esfera Padrão

No Série : D0106

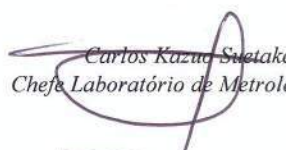
Certificado No : 00848/12

Emitido em : 09/02/2012

Validade : 02/2014

Data da Calibração : 28 de Maio de 2013

Data da Emissão : 08 de Julho de 2013


Carlos Kazuo Suetake
Chefe Laboratório de Metrologia

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

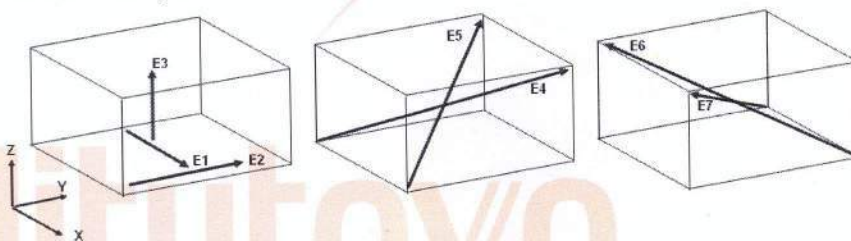
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0031

IV. Resultado das Medições :

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

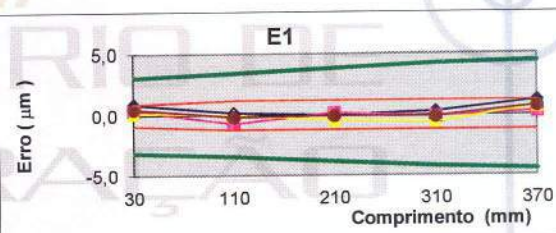
- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfícies de ref. : OK

4.2. Resultado da Medição:



4.2.1. Resultado da medição do eixo "X", (E1)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	-0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7



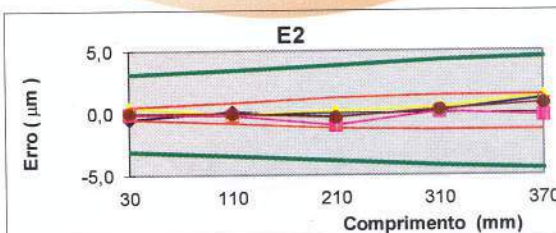
Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 88

4.2.2. Resultado da medição do eixo "Y", (E2)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,5	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,08

Graus de liberdade (Veff) = 33

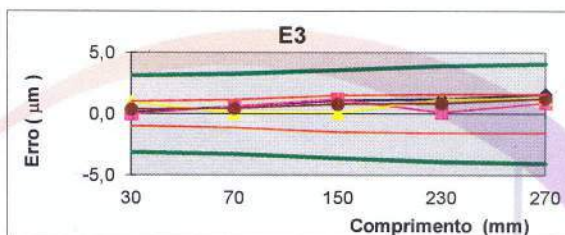
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0031

4.2.3. Resultado da medição do eixo "Z", (E3)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,0	1,0	0,4
70	0,6	0,6	0,1	0,4
150	1,1	1,2	0,1	0,8
230	1,2	0,1	1,2	0,8
270	1,6	0,9	1,3	1,3



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,9 + L/3000) \mu\text{m}$

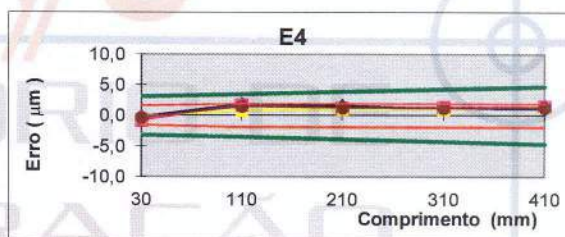
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,11

Graus de liberdade (V_{eff}) = 24

4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	1,9	1,7	0,9	1,5
210	1,6	1,2	1,1	1,3
310	1,2	1,4	1,1	1,2
410	1,1	1,5	1,4	1,3



Incerteza expandida de medição (U) = $(0,7 + L/2600) \mu\text{m}$

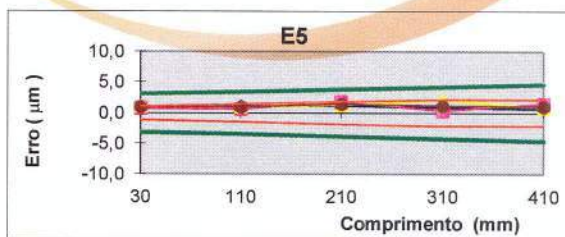
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,02

Graus de liberdade (V_{eff}) = 148

4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,8	1,1	0,9
110	1,1	0,7	1,0	0,9
210	1,2	1,8	1,3	1,4
310	0,9	0,4	2,1	1,1
410	0,7	1,5	0,9	1,0



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/2900) \mu\text{m}$

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (V_{eff}) = 59

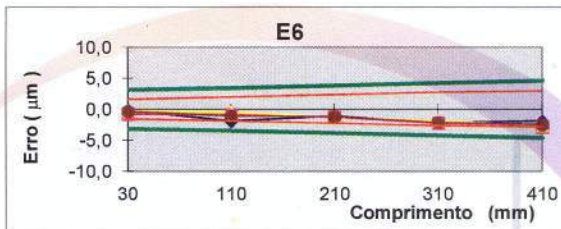
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

4.2.6. Resultado da medição do volume, (E6)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	-1,9	-0,9	-0,5	-1,1
210	-1,1	-1,3	-1,3	-1,2
310	-2,2	-2,3	-1,9	-2,1
410	-1,9	-2,9	-2,7	-2,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/2800) \mu\text{m}$

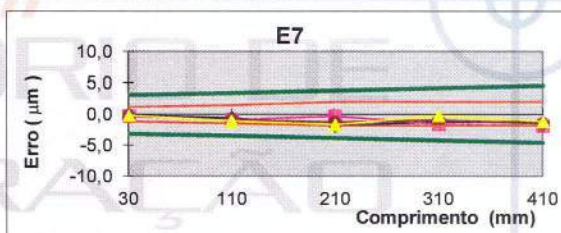
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (V_{eff}) = 65

4.2.7. Resultado da medição do volume, (E7)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
110	-0,6	-0,9	-1,1	-0,9
210	-1,9	-0,3	-1,7	-1,3
310	-1,2	-1,6	-0,2	-1,0
410	-1,3	-1,9	-1,2	-1,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,07

Graus de liberdade (V_{eff}) = 38

4.2.8. Erro de Apalpação (P)

Erro de apalpação = $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$

Fator de abrangência (k) = 2,00

Graus de liberdade (V_{eff}) = infinito



5. Observações Gerais :

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 : $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
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.

OBSERVAÇÕES :

- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.
- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- k = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / 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 BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

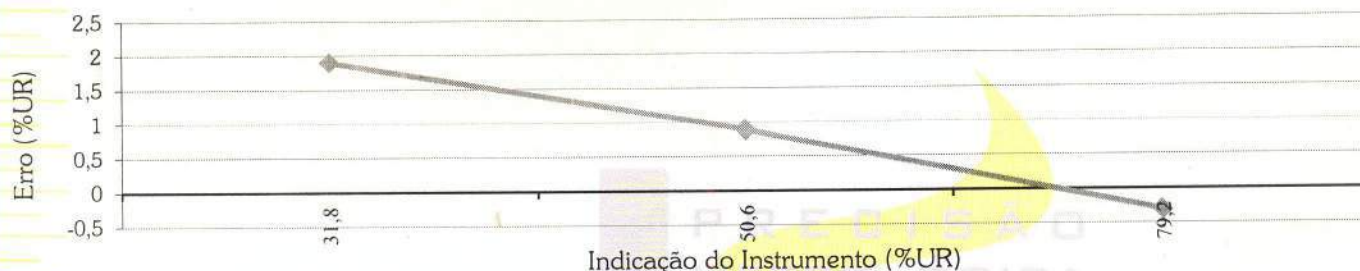
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

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

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

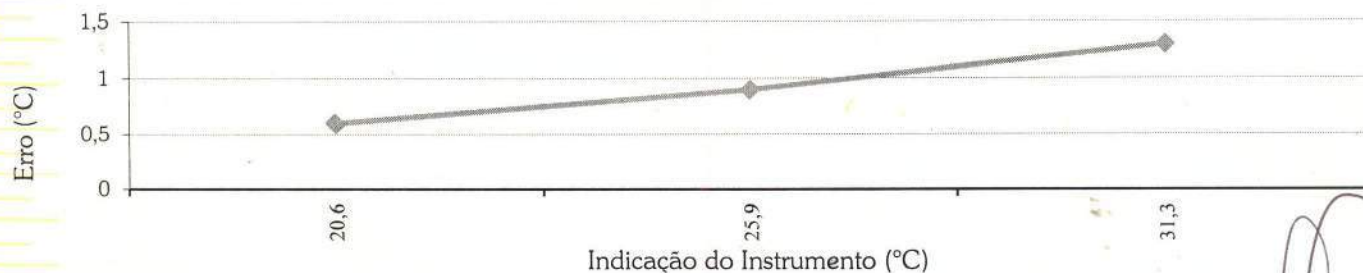
Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞




TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

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

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



	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: Laboratório de Metrologia Dimensional

Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121

Telefone: (34) 3239-4584

E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

Instrumento: Máquina Universal de Medir Comprimentos

Tipo: Analógico

Fabricante: Carl Zeiss Jena

Faixa de medição: 100 mm

Resolução: 0,1 μ m

Identificação: U 32 743 251

Última calibração: Não consta

3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2012

Data do pedido: 15/06/2012

Data da calibração: 27/06/2012

4. Descrição

A análise visual da máquina constatou: marcas de oxidação na superfície do fuso; partículas das mais diversas impurezas (poeira, vaselina com aspecto degradável, fiapos, óleo proveniente do contato com as mãos, dentre outros) nas guias por onde se deslocam os cabeçotes e nas superfícies de medição fixa e móvel; na lente externa da ocular foi observada uma camada de poeira.


Foi efetuada uma limpeza geral da máquina utilizando um pano embebido em álcool, cotonetes e escovas. Em seguida foi aplicada uma camada fina de vaselina sólida sobre todas as superfícies, que podem sofrer oxidação (fuso, fases de medição e guias) de modo a garantir a conservação e prevenir danos futuros.

Observou-se que a máquina não está perfeitamente nivelada, entretanto, por não possuir as chaves apropriadas para esse fim não foi melhorado o nivelamento. A imagem fornecida pela ocular mostra as três escalas com nitidez. Aparentemente, todos os componentes funcionam de forma adequada.

A inspeção visual dos blocos padrão não revelou nenhuma anomalia, quanto a sua conservação.

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

	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

5. Condições ambientais

Temperatura: $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Jogo de Bloco Padrão classe 0

Fabricante: Starrett

Identificação: Ref.: RS12.MA1

Faixa nominal: 2,5 a 75 mm


Número do Certificado de Calibração: 1505/11

Incerteza expandida:

Incerteza dos blocos padrão	
VN [mm]	IM (U) [μm]
2,5	0,08
5,1	0,08
7,7	0,08
10,3	0,09
12,9	0,09
15,0	0,09
17,6	0,09
20,2	0,09
22,8	0,09
25,0	0,09
50,0	0,11
75,0	0,12

VN = Valor Nominal; **IM** = Incerteza de Medição

Nota: k igual a 2 para todos os casos

	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

6. Resultados da calibração

Resultado da calibração (mm)							
VVC	L1	L2	L3	L4	L5	Média	Desvio Padrão
0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	0
7,7000	7,7003	7,7002	7,7000	7,7003	7,7001	7,7002	0,000130
10,3000	10,3005	10,3002	10,3004	10,3005	10,3006	10,3004	0,000152
17,6000	17,6004	17,6002	17,6003	17,6003	17,6003	17,6003	0,000071
20,2000	20,2004	20,2005	20,2004	20,2003	20,2003	20,2004	0,000084
25,0000	25,0008	25,0004	25,0007	25,0004	25,0004	25,0005	0,000195
50,0000	50,0002	50,0002	50,0003	50,0000	50,0000	50,0001	0,000134
75,0000	75,0006	75,0002	75,0003	75,0001	75,0003	75,0003	0,000187
87,9000	87,9003	87,9004	87,9006	87,9005	87,9002	87,9004	0,000158
100,0000	100,0002	100,0004	100,0002	100,0000	100,0001	100,0002	0,000148

Resultado da calibração			
VVC (mm)	Erro (µm)	Erro + 2s (µm)	Erro -2s (µm)
0	0	0	0
2,5	0	0	0
7,7000	0,18	0,44	-0,08
10,3000	0,44	0,74	0,14
17,6000	0,30	0,44	0,16
20,2000	0,38	0,55	0,21
25,0000	0,54	0,93	0,15
50,0000	0,14	0,41	-0,13
75,0000	0,30	0,67	-0,07
87,9000	0,40	0,72	0,08
100,0000	0,18	0,48	-0,12

Observações:

VVC - variabilidade das leituras;

VI – valor de indicação médio;

Tendência – valor de indicação médio (VI) menos o valor verdadeiro convencional (VVC);

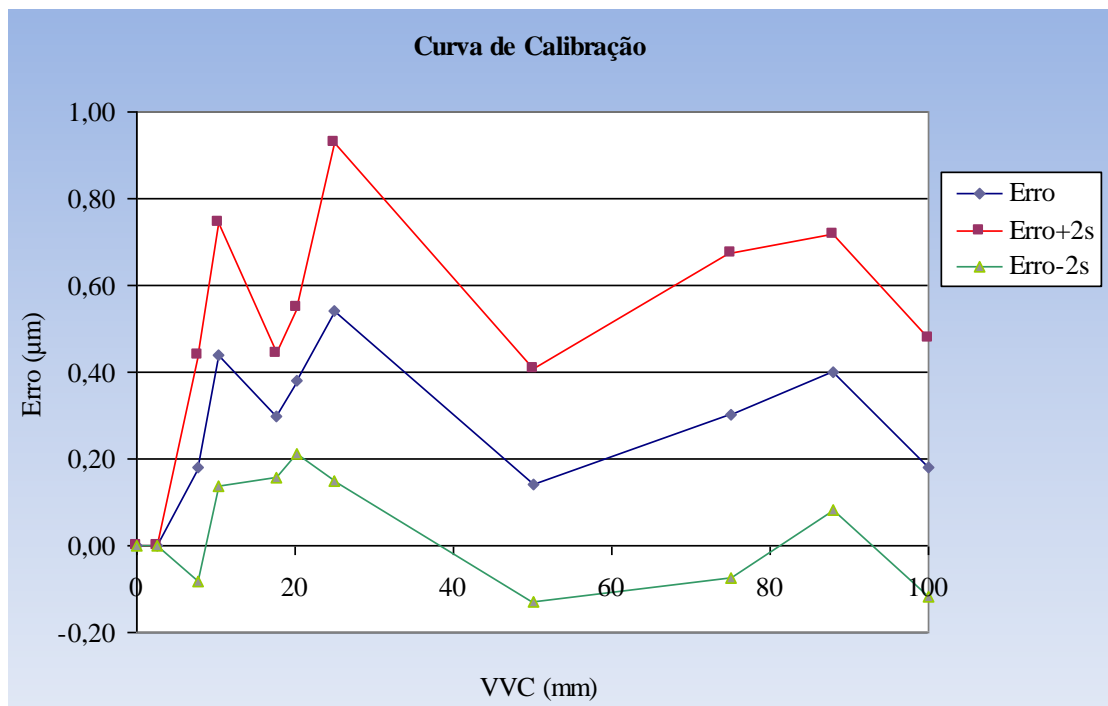
[k] – fator de abrangência.

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

Certificado de Calibração: CCA-0009/2012

7. Curva de calibração




8. Incerteza da calibração

Componentes de incerteza				
VVC (mm)	u_c (µm)	GLE	k	U (µm)
0	0,0833	48,0693	0,011	0,2
2,5000	0,0835	48,5345	2,011	0,2
7,7000	0,1036	21,736	2,080	0,2
10,3000	0,1419	9,024	2,266	0,3
17,6000	0,1279	21,83	2,080	0,3
20,2000	0,1096	294,90	1,903	0,2
25,0000	0,1450	30,60	2,042	0,3
50,0000	0,2054	549,72	1,964	0,4
75,0000	0,2041	610,57	1,974	0,6
87,9000	0,3372	2065,27	1,961	0,7
100,0000	0,3773	4185,90	1,961	0,7

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

	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 5 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

A incerteza expandida 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.

Data da Emissão: Uberlândia, (3) de (julho) de (2012).

Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

(Bruno e Luiz)
Operador



LABORATORIO DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº : 018/13

CARACTERÍSTICAS DO OBJETO

Cliente:	Universidade Federal de Uberlândia	Capacidade:	250 mm
Objeto:	Erro de Forma	Menor Divisão:	6nm faixa 0,4mm
Fabricante:	Taylor Hobson Limited	Ano de Fabricação:	NC
Modelo:	Talyrond 131 - 112-2765-02	OS:	NC
Número de Controle:	NC	Número de Série:	48

PROCEDIMENTOS E/OU NORMAS APLICADAS

Procedimento de Calibração: Calibração efetuada baseada no manual de serviço do equipamento.

CONDIÇÕES DO ENSAIO

Temperatura: 20,0 +/- 1° C

PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S) NA CALIBRAÇÃO


Modelo	Nº Série	Descrição	Identificação	Próxima Calibração	Nº Certificado / Emissor
112/436	6047	Semisfera de Vidro	01	02.12.13	48189 / Taylor Hobson - UKAS

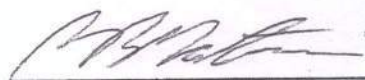
OBSERVAÇÕES GERAIS

Notas:

- 1- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores de k são apresentados.
- 2- A reprodução deste certificado só poderá ser completa, para realização da reprodução parcial, somente com a aprovação por escrito do Laboratório de Calibração Taylor Hobson do Brasil.
- 3- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- 4- O objeto referenciado no certificado encontra-se funcional e em condição de ser calibrado, mas não o isenta do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.

Data da Calibração: 13.05.13
Local da Calibração: Laboratório Universidade Federal de Uberlândia
Endereço do Cliente: Av. João Naves de Avila, 2121.
Bloco 1M, Campus Santa Monica.
Uberlândia - MG


Fernando Lopez
Técnico Calibrador


Marcello B. Montagnani
Responsável Técnico
Data da Emissão: 03.06.13

Data da Última Calibração: NC
CÓDIGO DO FORMULÁRIO: 01.1281.009.001



Certificado de Calibração

Nº : 018/13

1-Resultados da Calibração de Circularidade Antes dos Ajustes:

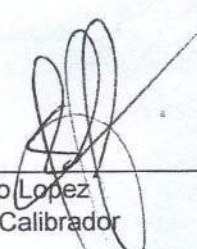
Valores Obtidos					Erro (μm)	Incerteza do Padrão +/- (μm)	Fator de Abrang. k	Incerteza Expand. +/- (μm)
X1 (μm)	X2 (μm)	X3 (μm)	X4 (μm)	X5 (μm)				
0,26	0,19	0,22	0,25	0,19	0,222	0,005	2,57	0,040

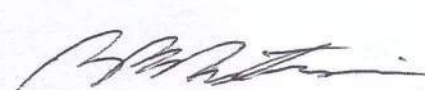
2-Resultados da Calibração de Circularidade Após os Ajustes:

Valores Obtidos					Erro (μm)	Incerteza do Padrão +/- (μm)	Fator de Abrang. k	Incerteza Expand. +/- (μm)
X1 (μm)	X2 (μm)	X3 (μm)	X4 (μm)	X5 (μm)				
0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,062	0,005	1,97	0,011

OBSERVAÇÕES:

Erro de circularidade do padrão utilizado: 0,06 μm


Fernando Lopez
Técnico Calibrador


Marcello B. Montagnani
Responsável Técnico


Taylor Hobson do Brasil Ltda.

Rua Gaspar Lourenço, 605 - Vila Mariana - 04107-000 - São Paulo - SP

Tel.(0XX11)5083-3846 - Fax.(0XX11)5083-3846

www.taylorhobson.com.br

2 de 2

	Data: 15/04/2013	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2013		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: LPU
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: Não consta

3. Calibração

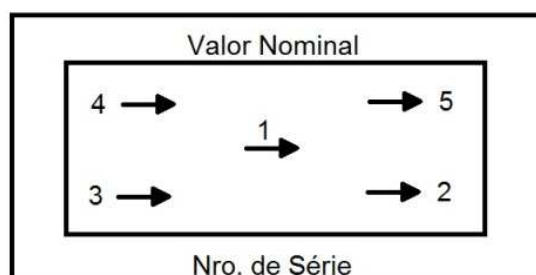
Ordem do serviço: 01/2013
Data do pedido: 15/04/2013
Data da calibração: 15/04/2013

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 é dividido em duas partes, (Ra igual a 0,38 μm e Ra igual a 2,94 μm) em cada uma foram adotadas cinco posições e efetuadas cinco medições em cada posição, totalizando 50 medições.

As posições de medição podem ser observadas 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

	Data: 15/04/2013	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2013		

Condições de Medição:

Ra (0,38 µm)

Comprimento de avaliação (ln) = 0,4 mm

Cut-off (lr) = 0,08 mm

Ra (2,94 µm)

Comprimento de avaliação (ln) = 12,5 mm

Cut-off (lr) = 2,5 mm

5. Condições ambientais

Temperatura: (20 ± 1) °C

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade

Fabricante: Mitutoyo

Código: 178-604

Número de série: 001031008

Valores nominais: Ra (0,38 µm e 2,94 µm)

Número do Certificado de Calibração: 15218/11


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

7. Resultados da calibração

Ra (0,38 µm)							
	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Média	Desvio Padrão
Posição 1	0,42	0,43	0,42	0,42	0,42	0,4220	0,0045
Posição 2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,46	0,4520	0,0045
Posição 3	0,45	0,45	0,45	0,44	0,43	0,4400	0,0089
Posição 4	0,44	0,45	0,45	0,44	0,44	0,4400	0,0055
Posição 5	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,4200	0

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

	Data: 15/04/2013	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2013		

Ra (2,49 µm)

	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Média	Desvio Padrão
Posição 1	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	0
Posição 2	2,96	2,98	2,96	2,96	2,96	2,96	0,0089
Posição 3	3,00	2,98	3,00	3,00	2,98	2,99	0,0110
Posição 4	2,98	2,98	2,96	2,96	2,96	2,97	0,0110
Posição 5	2,98	3,00	3,00	2,98	2,96	2,98	0,0167

8. Incerteza da calibração

	Ra (0,38 µm)		Ra (2,94 µm)	
	U (µm)	k	U (µm)	k
Posição 1	0,03	2,31	0,03	2,31
Posição 2	0,03	2,31	0,03	2,23
Posição 3	0,03	2,23	0,03	2,21
Posição 4	0,03	2,27	0,03	2,21
Posição 5	0,03	2,31	0,03	2,18

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.

Data da Emissão: Uberlândia, (25) de (abril) de (2013).

Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

José Eduardo Silveira Leal
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

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Issued By Taylor Hobson Calibration Laboratory

Issue Date: 15-July-2009

Certificate No: 47596

Date of Calibration : 14-July-2009



0026



Taylor Hobson Limited
2 New Star Road
Leicester, LE4 9JQ
England

Tel: +44 116 2463104
Fax: +44 116 2463058
E-Mail: calibration-uk.lei@ametek.co.uk
Internet: <http://www.taylor-hobson.com>

Page 1 of 2 Pages

APPROVED
SIGNATORY

C.J.Phillips

Description: Roughness Standard
Code Number: 112/1534
Serial Number: 8556
Manufactured by: Taylor Hobson Ltd
Calibrated For: Taylor Hobson do Brazil Ltd
R Gaspar
Lourenco 605 CEP Vila Mariana
Sao Paulo
04107-001
Brazil

Acting as Agent for:

Customer Order Number: THB 1321
Taylor Hobson Order Number: 236710

Previous Certificate Number: Not Applicable
Records Reference: Network
Calibration Temperature: 20°C \pm 1°C
Date Received into Laboratory: 13-July-2009

division of

AMETEK

Certified:

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of both the United Kingdom Accreditation Service and ISO.17025. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

UKAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY 0026

15 July 2009

Serial Number: 47596

Page 2 of 2

This standard has been calibrated using computerised traceable measuring techniques on a Taylor Hobson Form Talysurf instrument. All measurements were taken using a 90° conisphere diamond tip stylus with a nominally 2µm spherical radius. A traversing speed of 0.5mm per second, an X-axis sampling rate of 0.25µm, Z-axis resolution of 3.2nm and software stylus tip/arcuate correction have been applied throughout the measurements.

The surface finish portion of the standard was calibrated in accordance with ISO 4287:2000 and ISO 4288:1998 utilising a 0.8mm Gaussian filter cut-off with a bandwidth ratio of 300:1. The mean Ra value was calculated from twenty measurements taken 0.8mm apart within the calibration rectangle, the results obtained, rounded to the nearest 0.01µm, are shown in Table 1.

The uncertainty of calibration for amplitude parameters is $\pm(2\%+0.004\mu\text{m})$ of the mean value. When added to the standard deviation of the measurements, this gives a maximum uncertainty of calibration as stated in Tables 1 & 2.

Included in the tabulated results is a calculated imperial equivalent.

Table 1

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.11µm	0.017µm	±0.144µm
241µin	0.7µin	±5.7µin

The measured surface finish data was re-analysed using a 0.8mm 2CR filter cut-off with a bandwidth ratio of 100:1, the mean Ra result, rounded to the nearest 0.01µm, is shown in Table 2. This value should be used when calibrating instruments with filter options that do not conform to ISO 4288:1996.

Table 2

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.05µm	0.017µm	±0.142µm
238µin	0.7µin	±5.6µin

Upon receipt into the laboratory the standard was marked: 6.00µm
236µin

Certified:



The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.