

CLÁUDIO COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PONTA DO APALPADOR
NA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES
FRESADAS, MANDRILADAS E BRUNIDAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

CLÁUDIO COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PONTA DO APALPADOR NA MEDIÇÃO
DA RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIES FRESADAS, MANDRILADAS E
BRUNIDAS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Coorientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA – MG

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Cláudio Costa, 1988-
2019 Avaliação do Efeito da Ponta do Apalpador na Medição da Rugosidade em Superfícies Fresadas, Mandriladas e Brunidas [recurso eletrônico] / Cláudio Costa Souza. - 2019.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.
Coorientador: Luciano José Arantes.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2084>

Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Arencibia, Rosenda Valdés, 1969-, (Orient.). II. Arantes, Luciano José, 1974-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 551, COPEM				
Data:	vinte e nove de julho de dois mil e dezenove	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	11722EMC001				
Nome do Discente:	Cláudio Costa Souza				
Título do Trabalho:	Avaliação do Efeito da Ponta do Apalpador na Medição da Rugosidade em Superfícies Fresadas, Mandriladas e Brunidas				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se na Sala 310 - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Antonio Piratelli-Filho - UNB; Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU; Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Rosenda Valdés Arencibia, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2019, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2019, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Piratelli Filho, Usuário Externo**, em 29/07/2019, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1421820** e o código CRC **9D80E692**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pelas infinitas oportunidades de crescimento.

À UFU (Universidade Federal de Uberlândia), à FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro e por oferecerem as condições para o desenvolvimento deste trabalho.

À Embraco, por fornecer o material necessário para análise e, desta forma, viabilizar a realização deste projeto de pesquisa.

À minha orientadora prof^a. Rosenda Valdés Arencibia, pelos valiosos ensinamentos e pelo comprometimento e paciência em todos os projetos que nós desenvolvemos juntos. Seus exemplos me inspiram a ser um profissional melhor dia após dia.

Ao meu coorientador prof. Luciano José Arantes, por me transmitir conhecimentos importantes e por estar sempre disponível para conversar a respeito deste trabalho.

À minha esposa Thaisa T. Ishimine Costa, por seu amor e dedicação e por me apoiar nos momentos mais importantes de nossa trajetória.

Ao meu querido filho Rafael Ishimine Costa, por sua alegria contagiante e por me ensinar coisas que eu jamais imaginei que aprenderia com alguém tão novo.

À minha mãe Maria do Rosário Costa, que mesmo depois de tantos anos, continua fazendo tudo para que eu me torne uma pessoa mais feliz e realizada.

Ao meu pai Cláudio Vanderly de Souza, por ter me dado a base para o desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu irmão Frederico Costa Souza, por estar sempre presente na minha vida e por me acompanhar na descoberta de novas ideias e filosofias que libertam nossos espíritos.

Aos meus sogros Antonio Yoshio Ishimine e Nair Hatuko T. Ishimine, por me tratarem como um filho, fazendo todo o possível para que eu trilhasse o meu caminho com tranquilidade.

A Alzira Tamayoci, pelo enorme auxílio prestado a toda a minha família nos momentos mais delicados e decisivos.

À minha tia Maria Beatriz Ramos Costa, pelo carinho com que me trata desde que eu nasci.

À minha avó Iracy Ramos Costa, pelo incrível suporte prestado ao longo de toda a vida e por continuar me dando forças para eu fazer o melhor.

Ao meu grande amigo e eterno “irmão” José Eduardo Fernandes de Carvalho, pelos momentos alegres e descontraídos e por dar o maior exemplo de superação que eu presenciei até hoje.

Ao meu estimado amigo Lucas Lopes Lemos, que me acompanhou durante as primeiras pesquisas na área de Metrologia. Seu apoio foi fundamental para que eu permanecesse motivado mesmo diante dos maiores desafios.

Ao prof. Márcio Bacci da Silva, por estar sempre disponível para auxiliar nas pesquisas e por ajudar com a utilização de alguns equipamentos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação José Eduardo Leal, Guilherme Antonelli, Denis Barbosa e Marco Túlio Alves, pelo companheirismo e por contribuírem com o meu aprendizado.

A Nice de Fátima Silva, Neurizon de Paula, Célio Lourenço, Jussara Ishimine, Rosângela Claudino e todos os demais irmãos de luz que me amparam incessantemente e com muito amor nos processos de desenvolvimento espiritual e de expansão da consciência.

Aos amigos Rafael Novais, Evandro Monteiro e Rafael Monteiro, por tornarem muitos dos meus dias mais leves e divertidos.

SOUZA, C. C. **Avaliação do Efeito da Ponta do Apalpador na Medição da Rugosidade em Superfícies Fresadas, Mandriladas e Brunidas**. 2019. 127 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do raio da ponta do apalpador na medição dos parâmetros de rugosidade em superfícies fresadas, mandriladas e brunidas de blocos de compressores herméticos constituídos de ferro fundido cinzento. Medições de rugosidade foram efetuadas em 10 blocos de compressores herméticos por meio das pontas de raios de 2 μm e 5 μm . Para as superfícies fresadas e mandriladas, os parâmetros de rugosidade R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ foram obtidos, enquanto que para as superfícies brunidas, os parâmetros R_k , Rpk e Rvk foram estudados. A partir dos resultados obtidos, foi concluído que para as superfícies fresadas e mandriladas, apenas os valores de $R\Delta q$ apresentaram diferenças estatisticamente significativas, considerando um nível de confiabilidade de 95 %. No entanto, uma atenção especial deve ser dada ao parâmetro R_v , uma vez que seus p -valores foram maiores que 0,05, mas permaneceram muito próximos desse número. Para as superfícies brunidas, os valores médios dos parâmetros R_k e Rpk foram maiores nas medições efetuadas por meio da ponta de 5 μm , devido ao aumento do raio de curvatura dos picos de perfil. Não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas relativas aos parâmetros R_k , Rpk e Rvk .

Palavras-chave: Rugosidade Superficial. Medição com Contato. Ponta do Apalpador. Parâmetros de Rugosidade. Incerteza de Medição.

SOUZA, C. C. **Evaluation of the Effect of Stylus Tip on Roughness Measurement of Milled, Bored and Honed Surfaces.** 2019. 127 f. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This work deals with evaluation of the effect of the stylus tip radius on the roughness parameters on milled, bored and honed surfaces of crankcase of hermetic compressors manufactured in gray cast iron. Roughness measurements were carried out on machined surfaces of 10 crankcases of hermetic compressors using a 2 and a 5 μm stylus tip radius. For milled and bored surfaces R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q and $R\Delta q$ roughness parameters were obtained, whereas for honed surfaces R_k , Rpk and Rvk were studied. From the obtained results it was concluded that for milled and bored surfaces, only the values of $R\Delta q$ presented statistically significant differences, considering a confidence level of 95 %. However, particular attention should be given to the R_v parameter whose p -values were higher than 0.05, but very close to it. For honed surfaces, the average values of R_k and Rpk parameters were higher for measurements carried out using a 5 μm stylus tip radius, due to the increase of the peak radius of curvature. No statistically significant difference related to Rpk , R_k and Rvk parameters was identified.

Keywords: Surface Roughness. Contact Measurement. Stylus Tip. Roughness Parameters. Measurement Uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Superfícies geométrica, real e efetiva (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).....	7
Figura 2.2	Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 2013).....	8
Figura 2.3	Representação da linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI,1977). Adaptada.	10
Figura 2.4	Elemento de um perfil, conforme NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	11
Figura 2.5	Altura máxima do pico do perfil, como apresentada pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	11
Figura 2.6	Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	12
Figura 2.7	Altura máxima do perfil, como apresentada pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	12
Figura 2.8	Representação do parâmetro R_a para diferentes perfis (TAYLOR HOBSON, 2003).....	13
Figura 2.9	Inclinações em alguns pontos de um elemento de perfil, conforme a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).....	14
Figura 2.10	Curva de <i>Abbott-Firestone</i> (TAYLOR HOBSON, 2000).....	14
Figura 2.11	Rugosímetro eletromecânico do fabricante Mitutoyo.....	16
Figura 2.12	Interferômetro de luz branca do fabricante Mitutoyo.....	16
Figura 2.13	Efeitos provocados pela geometria da ponta do apalpador no perfil de rugosidade medido (LEACH, 2014).....	17
Figura 2.14	Diferentes combinações de raio de ponta e ângulo de cone dos apalpadores para medição de rugosidade (MITUTOYO, 2016).....	18
Figura 2.15	Perfis de rugosidade obtidos para diferentes direções de apalramento (LEACH, 2014).....	19

Figura 2.16	Sulcamento em amostra de alumínio torneada provocada pela medição com rugosímetro eletromecânico (DOBES et al., 2017).....	21
Figura 2.17	Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989).....	23
Figura 2.18	Processo de mandrilamento cônico (a) e processo de mandrilamento cilíndrico (b) (FERRARESI, 1970).....	24
Figura 2.19	Processo de mandrilamento radial (a) e processo de mandrilamento de superfícies especiais (b) (FERRARESI, 1970).....	25
Figura 2.20	Direções de corte no brunimento convencional (a) e superfície com sulcos gerada pelo processo (b) (AARON, 1995).....	26
Figura 2.21	Regiões de formação elástica e plástica na formação de cavaco (ODEBRECHT, 2003).....	28
Figura 3.1	Vista frontal do bloco de compressor hermético do fabricante Embraco.	39
Figura 3.2	Vista explodida do compressor hermético.....	40
Figura 3.3	Bloco de compressor hermético do fabricante Embraco.....	41
Figura 3.4	Rugosímetro eletromecânico portátil modelo 112/1590 do fabricante Taylor Hobson.....	44
Figura 3.5	Apalpadores com pontas de raios de 2 μm e 5 μm utilizados nas medições de rugosidade.....	44
Figura 3.6	Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies fresadas.....	45
Figura 3.7	Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies mandriladas.....	45
Figura 3.8	Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies brunidas.....	46
Figura 4.1	Valores médios dos parâmetros de amplitude referentes às superfícies fresadas com as respectivas incertezas expandidas (95 % de confiabilidade).....	53
Figura 4.2	Valores médios do parâmetro híbrido $R\Delta q$ referentes às superfícies fresadas com as respectivas incertezas expandidas (95 % de confiabilidade).....	53

Figura 4.3	Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies fresadas.....	54
Figura 4.4	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície fresada do bloco de compressor 3 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	55
Figura 4.5	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície fresada do bloco de compressor 8 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	55
Figura 4.6	Valores médios dos parâmetros de amplitude referentes às superfícies mandriladas com as respectivas incertezas expandidas (95 % de confiabilidade).....	58
Figura 4.7	Valores médios do parâmetro híbrido $R\Delta q$ referentes às superfícies mandriladas com as respectivas incertezas expandidas (95 % de confiabilidade).....	59
Figura 4.8	Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies mandriladas.....	59
Figura 4.9	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície mandrilada do bloco de compressor 2 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	60
Figura 4.10	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície mandrilada do bloco de compressor 4 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	61
Figura 4.11	Diferenças em porcentagem nas medições dos parâmetros de rugosidade efetuadas com as pontas de raios 2 μm e 5 μm nas superfícies fresadas e mandriladas.....	63
Figura 4.12	Valores médios dos parâmetros da família Rk referentes às superfícies brunidas.....	64
Figura 4.13	Efeitos da ponta do raio do apalpador na medição do parâmetro Rpk	65
Figura 4.14	Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies brunidas.....	66

Figura 4.15	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 5 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	67
Figura 4.16	Curva de <i>Abbott-Firestone</i> obtida na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 5 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	67
Figura 4.17	Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 9 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	68
Figura 4.18	Curva de <i>Abbott-Firestone</i> obtida na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 9 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comprimentos de amostragem (<i>cut-off</i>) e avaliação para medição de rugosidade em função do parâmetro <i>Ra</i> , conforme NBR ISO 4288 (ABNT, 2008).....	9
Tabela 2.2	Efeito de diferentes tipos de filtro nas análises do perfil de rugosidade (OLIVEIRA, 2004).....	20
Tabela 2.3	Dados de um experimento com um único fator e <i>a</i> tratamentos.....	35
Tabela 2.4	Análise de variância com um único fator e efeitos fixos.....	37
Tabela 3.1	Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies fresadas dos blocos de compressores herméticos.....	42
Tabela 3.2	Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies mandriladas dos blocos de compressores herméticos.....	42
Tabela 3.3	Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies brunidas dos blocos de compressores herméticos.....	43
Tabela 3.4	Dados relativos ao cálculo das incertezas-padrão para as medições dos parâmetros de rugosidade avaliados.....	48
Tabela 4.1	Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies fresadas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %)......	52
Tabela 4.2	Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ das superfícies fresadas.....	56

Tabela 4.3	Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies mandriladas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %)......	57
Tabela 4.4	Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ das superfícies mandriladas....	62
Tabela 4.5	Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies brunidas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %)......	63
Tabela 4.6	Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros Rpk , Rk e Rvk das superfícies brunidas.....	69

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

2CR	Tipo de filtro eletrônico
a	Arredondamento do pico provocado pelo efeito do raio da ponta do apalpador
a	Número de tratamentos no planejamento experimental
a_p	Profundidade de corte definida para o processo de usinagem
$A1$	Área 1 (superior à linha média)
$A2$	Área 2 (inferior à linha média)
$A3$	Área 3 superior à linha média)
$A4$	Área 4 (inferior à linha média)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
b	Diferença entre a profundidade real do vale e a profundidade medida
c	Altura medida do pico, que corresponde a sua altura real
D	Deformação do material dos blocos de compressores herméticos
dZ/dX	Média das inclinações do comprimento de amostragem
f	Avanço definido para o processo de usinagem
F_n	Força normal à superfície
F_t	Força tangencial à superfície
f -valor	Razão entre quadrados médios
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
k	Fator de abrangência
k_R	Fator de abrangência utilizado no cálculo da incerteza expandida relacionada à calibração do rugosímetro

L_e	Comprimento de amostragem
L_m	Comprimento de avaliação
L_n	Percurso final do apalpador
l_r	Comprimento considerado para o cálculo do Ra e do Rq
L_t	Extensão total percorrida pelo apalpador
L_v	Percurso inicial do apalpador
LEMETRO	Laboratório de Ensino em Metrologia
m	Número de observações em um único tratamento no planejamento experimental
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
$Mr1$	Razão de material dos picos
$Mr2$	Razão de material dos vales
MQ_E	Média quadrática dos erros
$MQ_{Tratamentos}$	Média quadrática dos tratamentos
n	Número de leituras efetuadas
N	Número de variáveis que afetam a variável resposta Y
n_1	Número de observações da amostra 1
n_2	Número de observações da amostra 2
r	Raio da ponta
P_R	Parâmetro de rugosidade medido (mensurando)
p -valor	Probabilidade de significância
Ra	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
Rk	Rugosidade do núcleo do perfil
RM	Resultado da medição
Rp	Altura máxima do pico do perfil
RP	Fator raio da ponta
R_P	Raio da ponta do apalpador
Rpk	Rugosidade dos picos do perfil
R_R	Resolução do rugosímetro
Rq	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
Rt	Altura total do perfil
Rv	Profundidade máxima do vale do perfil
Rvk	Rugosidade dos vales do perfil

$r(x_i, x_j)$	Coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j
Rz	Altura máxima do perfil
$R\Delta q$	Inclinação quadrática média do perfil avaliado
s	Desvio padrão
S_P^2	Estimador combinado das variâncias S_1^2 e S_2^2
S_1^2	Variância da amostra aleatória 1 com n_1 observações
S_2^2	Variância da amostra aleatória 2 com n_2 observações
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SQ_E	Soma dos quadrados das diferenças entre as observações dentro de um tratamento e a média dos tratamentos
SQ_T	Soma total dos quadrados
$SQ_{Tratamentos}$	Soma dos quadrados das diferenças entre as médias dos tratamentos e a média global
$u_c(y)$	Incerteza-padrão combinada da variável y
t_{obs}	Valor do t observado
t_α	Valor do t tabelado correspondente ao nível de significância α especificado
$t_{\alpha/2}$	Valor do t tabelado correspondente à metade do nível de significância α especificado
T_μ	Penetração de início de corte
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
$U(IC_R)$	Incerteza expandida relacionada à calibração do rugosímetro
U_p	Incerteza expandida
$u(x)$	Incerteza-padrão da variável x
$u(x_i)$	Incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i
$u^2(x_i)$	Variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N
$u(\bar{x}(L_R))$	Incerteza-padrão associada à variável $\bar{x}(L_R)$
$u(\Delta D)$	Incerteza-padrão associada à variável ΔD
$u(\Delta IC_R)$	Incerteza-padrão associada à variável ΔIC_R
$u(\Delta R_P)$	Incerteza-padrão associada à variável ΔR_P
$u(\Delta R_R)$	Incerteza-padrão associada à variável ΔR_R
v_c	Velocidade de corte
x_i	Estimativa da variável X_i

$\bar{x}(L_R)$	Média aritmética dos valores indicados pelo sistema de medição
X_S	Comprimento do elemento de perfil
\bar{X}_1	Média das observações da amostra aleatória 1 com n_1 observações
X_{11}	Primeira observação da amostra aleatória 1 com n_1 observações
X_{12}	Segunda observação da amostra aleatória 1 com n_1 observações
X_{1n_1}	Observação n_1 da amostra aleatória 1 com n_1 observações
\bar{X}_2	Média das observações da amostra aleatória 2 com n_2 observações
X_{21}	Primeira observação da amostra aleatória 2 com n_2 observações
X_{22}	Segunda observação da amostra aleatória 2 com n_2 observações
X_{2n_2}	Observação n_2 da amostra aleatória 2 com n_2 observações
y	Estimativa da variável resposta Y
y_{ij}	j -ésima observação sujeita ao i -ésimo tratamento
Y_{ij}	Variável aleatória denotando a ij -ésima observação
y_{\cdot}	Somatória das m observações de um tratamento
\bar{y}_{\cdot}	Média das observações sujeitas ao i -ésimo tratamento
$y_{\cdot\cdot}$	Somatória de todos os y . da análise de variância
$\bar{y}_{\cdot\cdot}$	Média global de todas as observações
Z	Eixo das ordenadas (vertical)
Z_p	Altura do pico de perfil
Z_t	Altura do elemento de perfil
Z_v	Profundidade do vale de perfil
$Z(x)$	Ordenada do ponto x do perfil de rugosidade
ΔD	Correção associada à deformação do material do bloco de compressor durante a medição
ΔIC_R	Correção associada à incerteza de calibração do rugosímetro
ΔR_P	Correção associada ao raio de ponta do apalpador
ΔR_R	Correção associada à resolução do rugosímetro
α	Nível de significância
ε_{ij}	Componente do erro aleatório
η	Ângulo da direção efetiva
μ	Média global
μ_i	Soma da média global (μ) e do efeito do i -ésimo tratamento (τ_i)

μ_1	Média da população 1
μ_2	Média da população 2
σ^2	Variância
σ_1^2	Variância da população 1
σ_2^2	Variância da população 2
τ_i	i -ésimo tratamento

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução	1
1.1. Objetivo Principal	2
1.2. Objetivos Secundários	3
1.3. Justificativa	3
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	6
2.1. Rugosidade Superficial	6
2.1.1. Métodos de medição de rugosidade	15
2.1.2. Efeito do raio da ponta na medição de rugosidade com contato	17
2.1.3. Demais fontes de erro na medição de rugosidade com contato	18
2.2. Fundamentos de Usinagem	22
2.2.1. Fresamento frontal	22
2.2.2. Mandrilamento	24
2.2.3. Brunimento convencional	25
2.3. Incerteza de medição	28
2.4. Planejamento de Experimentos	33
2.4.1. Teste de hipóteses para a diferença de duas médias considerando as variâncias desconhecidas (teste <i>t</i> combinado)	33
2.4.2. Análise de Variância (ANOVA).....	34
CAPÍTULO III – Metodologia	38
3.1. Planejamento dos Experimentos	38
3.2. Medições dos Parâmetros de Rugosidade	43
3.3. Estimativa da Incerteza de Medição	47
3.4. Análise Estatística dos Dados Coletados	49

CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões	51
4.1. Efeitos do Raio da Ponta do Apalpados na Medição das Superfícies Fresadas	51
4.2. Efeitos do Raio da Ponta do Apalpados na Medição das Superfícies Mandriladas	57
4.3. Efeitos do Raio da Ponta do Apalpados na Medição das Superfícies Brunidas	63
CAPÍTULO V – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICES	
Apêndice I – Valores dos Parâmetros de Rugosidade Medidos	81
Apêndice II – Gráficos dos Resíduos em Função dos Valores Observados	84
Apêndice III – Gráficos dos Resíduos em Função dos Valores Preditos	93
ANEXOS	
Anexo I – Certificado de Calibração do Rugosímetro	102
Anexo II – Certificado de Calibração do Termohigrômetro Digital	105

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação das superfícies reais em relação aos sólidos geométricos que os definem e são classificados como macro e microgeométricos (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977). Os desvios de forma macrogeométricos expressam as diferenças do perfil ou da superfície reais das peças fabricadas em relação a uma reta (retitude), círculo (circularidade), cilindro (cilindricidade) ou plano (planeza). As ondulações da peça geradas por imprecisões de movimentos dos equipamentos também são consideradas como desvios macrogeométricos.

Por outro lado, a rugosidade superficial é classificada como um desvio microgeométrico. De acordo com Agostinho; Rodrigues; Lirani (1977), a rugosidade consiste na soma das diferenças de 3ª a 5ª ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem. Estas diferenças de 3ª e 5ª ordem são aquelas que se repetem de forma regular ou irregular e cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade. No entanto, é importante destacar que a rugosidade é um desvio que se observa em peças submetidas a quaisquer processos de fabricação e não apenas à usinagem.

O estudo da rugosidade é fundamental nos casos em que se observa atrito, desgaste ou corrosão entre duas ou mais peças que funcionam acopladas. Ainda, a rugosidade é importante para garantir a aparência desejada da peça, resistência à fadiga, transmissão de calor e escoamento de fluidos (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

As medições de rugosidade superficial são efetuadas com o propósito de verificar se os desvios microgeométricos dos componentes avaliados não extrapolam os valores da tolerância do projeto. Os métodos de medição de rugosidade são classificados em: com contato e sem contato. Enquanto a medição com contato ocorre por meio de um apalpador que toca a peça

para levantar o perfil efetivo e indicar os valores dos parâmetros de interesse, a medição sem contato se caracteriza pelo uso da interferometria, indução ou força atômica para a obtenção dessas e de outras informações adicionais, como as topografias das superfícies analisadas.

Os equipamentos que efetuam medições com contato e sem contato apresentam diferenças consideráveis em termos construtivos, de princípio de funcionamento e de poder de diagnóstico. Para as medições com contato, os equipamentos são geralmente portáteis e podem ser adquiridos por um preço consideravelmente menor. Já os equipamentos para medição sem contato são mais dispendiosos (LEACH, 2014).

Todos os sistemas de medição apresentam fontes de erro e, no caso dos equipamentos que realizam medições de rugosidade com contato, muitos autores alertam para os aspectos relacionados à geometria e ao raio da ponta do apalpador. Leach (2014) e Bhushan (2000) citam o fato de que quanto maior for a ponta do apalpador, menor será a sua capacidade de penetração nos vales do perfil. Apesar disso, raros são os trabalhos que estudam e quantificam o efeito da ponta do apalpador nos valores de rugosidade. Motta-Neto et al. (2018) observaram que, apesar do raio da ponta afetar os valores de rugosidade, em muitos casos a diferença observada não é estatisticamente significativa.

Pelo exposto, este trabalho visa a contribuir com o entendimento dos efeitos provocados pelo raio da ponta do apalpador nos valores de rugosidade. Para isso, foram avaliados diferentes parâmetros de rugosidade das principais superfícies usinadas de blocos de compressores herméticos. Os processos de usinagem utilizados para se obter as superfícies acabadas dos compressores foram o fresamento frontal, o mandrilamento e o brunimento convencional. O fato de se empregar diferentes processos de fabricação às superfícies garante que os perfis de rugosidade apresentem características específicas e distintas entre si, no que diz respeito à amplitude, espaçamento e densidade dos elementos do perfil de rugosidade.

1.1 Objetivo Principal

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar o efeito do raio da ponta do apalpador do rugosímetro eletromecânico na medição com contato da rugosidade superficial em superfícies submetidas aos processos de fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional. Os parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q , $R\Delta q$ foram avaliados para as superfícies

fresadas e mandriladas, enquanto os parâmetros da família Rk (Rk , Rpk e Rvk) foram avaliados para as superfícies brunidas.

1.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desta dissertação consistem em:

- Fornecer informações a respeito dos raios da ponta do apalpador mais adequados para medição da rugosidade das superfícies de blocos de compressores herméticos submetidas aos processos de fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional. Essas informações são especialmente úteis para os operadores que realizam o controle microgeométrico das superfícies analisadas;
- Dar continuidade aos estudos efetuados com o propósito de quantificar os efeitos relacionados às dimensões da ponta do apalpador, de modo a contribuir também com o aumento da precisão das medições dos parâmetros de rugosidade.

1.3 Justificativa

Devido ao seu caráter microgeométrico, a medição da rugosidade requer o uso de equipamentos especificamente desenvolvidos para esse propósito, como os rugosímetros eletromecânicos e interferômetros, sendo que a medição pode ser efetuada com contato ou sem contato.

O método de medição de rugosidade por contato é a mais utilizada (LEACH, 2014). Nela, um apalpador entra em contato direto com a peça e um transdutor piezoelétrico ou indutivo converte o seu movimento vertical em um sinal elétrico (LEACH, 2014). A ponta do apalpador é constituída de diamante sintético. As possíveis fontes de erros neste tipo de medição consistem em: efeitos das vibrações mecânicas, direção de apalpamento, dimensão e geometria da ponta, deformação da peça devido à força de medição e características dos filtros utilizados.

Dentre as fontes de erro amplamente citadas e comentadas por diversos autores estão as dimensões e a geometria da ponta do apalpador. A geometria pode ser do tipo cone-esférica

ou pirâmide truncada e o raio da ponta esférica pode apresentar os valores de 2 μm , 5 μm e 10 μm , de acordo com a NBR ISO 3274 (ABNT, 2008).

Leach (2014) e Bhushan (2000) afirmaram que em superfícies caracterizadas por vales profundos e estreitos, a ponta do apalpador pode não ser capaz de atingir os pontos mais baixos do perfil. Nesses casos, quanto maior o raio da ponta utilizada, menor a sua capacidade de penetração nos vales dos perfis de rugosidade. Yoshida e Tsukada (2006) mencionaram que apesar dos métodos de medição de rugosidade por contato serem amplamente utilizados, as pontas dos apaladores atuam como filtros mecânicos, o que faz com que os perfis de rugosidade efetivos apresentem distorções em relação aos perfis reais. Ainda, Song (2014) citou o fato de que o aumento do raio da ponta do apalpador pode reduzir o valor do parâmetro Ra estimado.

Apesar dos referidos autores citarem que as diferentes dimensões e geometrias da ponta do apalpador podem interferir nos valores dos parâmetros de rugosidade medidos, poucas evidências práticas foram encontradas confirmando este fato, principalmente no que se refere às diferenças observadas entre medições efetuadas por meio de apaladores com raios de ponta distintos.

Uma contribuição importante a respeito do efeito da dimensão da ponta do apalpador nos valores dos parâmetros de rugosidade (Ra , Rt e Rv) foi dada por Lee e Cho (2012), que efetuaram uma análise teórica de perfis de superfícies bidimensionais. Os autores observaram que o parâmetro Rt foi o mais afetado pelo aumento do raio da ponta, enquanto que o parâmetro Ra foi o menos afetado. Eles concluíram também que, em superfícies mais rugosas, as pontas com raios entre 10 μm e 25 μm poderiam ser utilizadas para a obtenção de resultados satisfatórios.

Motta-Neto et al. (2018) mediram com um rugosímetro eletromecânico a rugosidade de amostras de alumínio comercial, aço carbono SAE 1020 e ferro fundido cinzento submetidas aos processos de fresamento e torneamento. Para a fabricação das amostras, as condições de corte foram alteradas, sendo que o avanço assumiu valores de 0,1 e 0,2 mm/rotação enquanto que a profundidade de corte foi de 0,5 e 1,0 mm. Durante a medição, o autor utilizou dois apaladores com pontas de raios de 2 μm e 5 μm .

Aplicando a técnica de Análise de Variância (ANOVA), ele concluiu que a utilização de raios de ponta diferentes provocou alterações estatisticamente significativas nos valores dos parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv e Rt em 46 % das condições avaliadas. Ainda, as diferenças observadas entre os valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv e Rt obtidos utilizando as

pontas de 2 e 5 μm foram menores que os respectivos valores estimados de incerteza expandida em 82 % dos casos, considerando um nível de confiança de 95 %.

Assim sendo, este trabalho é proposto com o intuito de dar continuidade ao processo de identificação das condições nas quais a utilização de mais de um raio de ponta é permitida, sem que a confiabilidade metrológica seja prejudicada. Para isso, algumas superfícies usinadas de blocos de compressores herméticos terão a rugosidade superficial avaliada por meio de um rugosímetro eletromecânico com apalpadores com pontas de raios de 2 μm e 5 μm .

A relevância deste trabalho se dá principalmente no meio industrial onde a medição com contato da rugosidade é a técnica mais utilizada para a caracterização de superfícies (MÜSER, 2016, NOVASKI, 2013, CHAND et al., 2011, PROUDHON; FOUVRY; BUFFIÈRE, 2005 e BHUSHAN, 2000) e o rugosímetro eletromecânico é o mais utilizado para a medição da rugosidade (LEACH, 2014 e LEE; CHO, 2012). Além disso, tornar os blocos dos compressores herméticos objetos de estudo neste projeto de pesquisa implica na análise metrológica de superfícies derivadas dos processos de usinagem e das condições de corte empregadas na indústria.

Os outros quatro capítulos que compõem essa dissertação são descritos a seguir.

O Capítulo II contém a revisão bibliográfica, que explora teoria relacionada aos temas rugosidade superficial, fundamentos de usinagem (fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional), incerteza de medição e planejamento de experimentos (com foco na técnica de ANOVA).

Já o Capítulo III trata sobre a metodologia aplicada para a obtenção dos resultados pretendidos. Ele foi dividido nas seções: planejamento dos experimentos, medições dos parâmetros de rugosidade, estimativa da incerteza de medição e análise estatística dos dados coletados.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos após a realização dos experimentos e as discussões relativas a eles.

Por fim, o capítulo V contém as conclusões finais da dissertação e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos relacionados ao tema rugosidade superficial, enfatizando os processos de medição, os equipamentos utilizados para a sua avaliação, as principais fontes de erro e as normas técnicas relativas ao assunto em questão. Também são abordados outros temas considerados relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, quais sejam: usinagem, incerteza de medição e planejamento de experimentos.

2.1 Rugosidade Superficial

As peças ou componentes mecânicos produzidos por meio dos processos de fabricação mecânica sempre apresentam diferenças de forma macro e microgeométricas em relação aos sólidos geométricos que os definem. Os desvios de forma macrogeométricos podem ser quantificados pelo uso de instrumentos de medição convencionais, enquanto os desvios microgeométricos exigem a utilização de aparelhos específicos (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

De acordo com Whitehouse (2011), a rugosidade consiste nas irregularidades de uma superfície que são inerentes ao processo de remoção de material, ao contrário das ondulações, que podem ser geradas devido ao desempenho inadequado das máquinas-ferramenta. Já Piratelli-Filho (2011) definiu rugosidade superficial como o conjunto de desvios microgeométricos caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

Agostinho; Rodrigues; Lirani (1977) destacaram que a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional e de forma e posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado.

Um dos principais documentos técnicos relativos à rugosidade superficial é a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002). Ela contém os termos, definições e parâmetros relacionados à medição da rugosidade superficial, ondulações e perfis primários de peças ou amostras pelo método do levantamento do perfil. Esta norma deve ser utilizada como base para a realização de quaisquer medições das características mencionadas. Isso se deve ao fato de ser necessário estabelecer métodos de cálculo e análise padronizados que possibilitam a comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores ou profissionais da indústria.

Para um melhor entendimento do conteúdo da NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), faz-se necessário abordar os conceitos das superfícies geométrica, real e efetiva (Fig. 2.1).

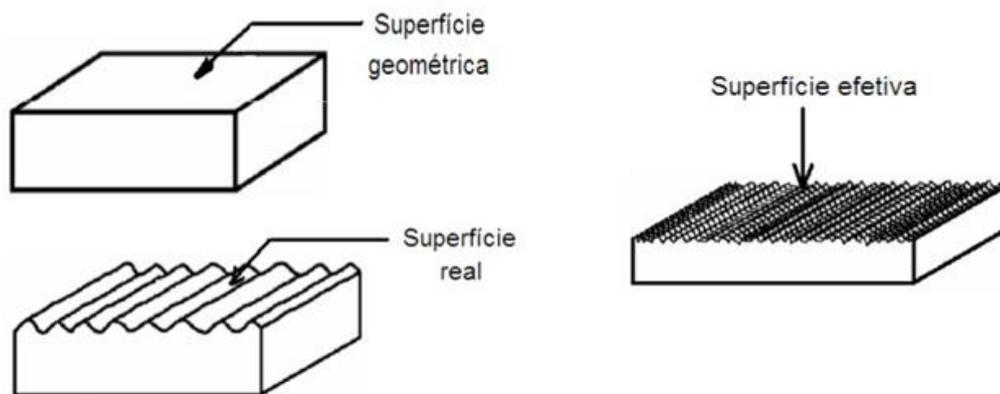


Figura 2.1 – Superfícies geométrica, real e efetiva (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Superfície geométrica é a superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma ou acabamento. Na realidade, tal superfície não existe, tratando-se apenas de uma referência (NOVASKI, 2013). Já a superfície real limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção, podendo ser vista e tocada (NOVASKI, 2013).

Por fim, a superfície efetiva é aquela avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo

aparelho de medição. No entanto, os diferentes sistemas e condições de medição podem resultar em diferentes superfícies efetivas (NOVASKI, 2013).

A partir das superfícies geométrica, real e efetiva, são determinados os perfis geométrico, real e efetivo. O perfil geométrico é a intersecção de uma superfície ideal com um plano perpendicular e o perfil real é a intersecção de uma superfície real com um plano perpendicular. Por fim, o perfil efetivo é a imagem aproximada do perfil real, obtido por meio de avaliação ou medição (NOVASKI, 2013).

Se for analisado o perfil real de uma peça, observa-se que ele contém componentes de onda com diferentes frequências. Como a rugosidade superficial é medida em uma determinada faixa de frequência, utilizam-se os filtros do tipo passa-alta para separar a rugosidade das ondulações e dos desvios de forma macrogeométricos (RAJA et al., 2002). Um destes filtros é denominado de comprimento de amostragem ou *cut-off*. A NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) define comprimento de amostragem como o comprimento, na direção do eixo X, usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação.

O comprimento de avaliação é o comprimento na direção do eixo X utilizado para estabelecer o perfil sob avaliação. De acordo com a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), ele pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. No entanto, na maioria das aplicações são considerados cinco comprimentos de amostragem, como mostra a Fig. 2.2.

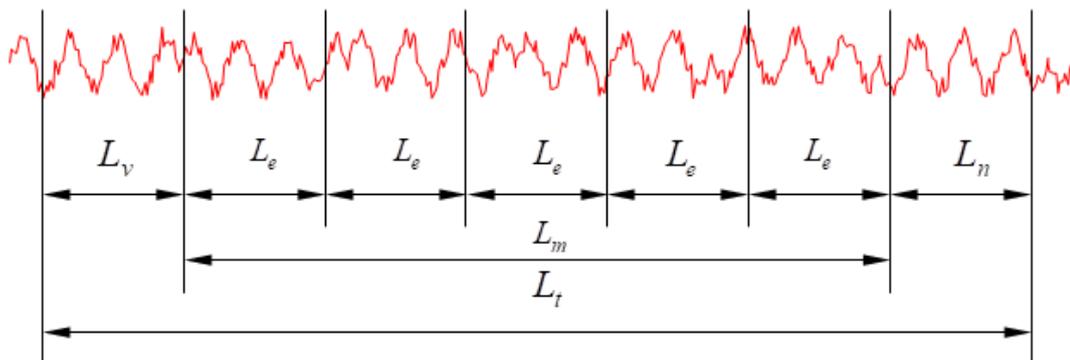


Figura 2.2 – Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 2013).

Na Figura 2.2, tem-se que:

- Percurso inicial (L_v): percurso não utilizado para avaliação. Permite o amortecimento das oscilações mecânicas e elásticas iniciais do sistema;

- Comprimento de amostragem (L_e): também chamado de *cut-off*, é um valor de frequência pré-determinado que define um limite sobre o valor de frequência que deve ser aprovado e qual deve ser descartado (filtro passa-alta). O objetivo é eliminar o efeito dos desvios de forma macrogeométricos na avaliação da rugosidade;
- Percurso final (L_n): percurso não utilizado para avaliação. Permite o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição;
- Comprimento de avaliação (L_m): extensão do trecho útil da medição, onde a medida deve ser realmente efetuada;
- Percurso total (L_t): extensão total percorrida pelo sensor ou apalpador.

Os valores de *cut-off* a serem empregados nas medições são definidos pela NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), conforme a Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Comprimentos de amostragem (*cut-off*) e avaliação para medição de rugosidade em função do parâmetro Ra, conforme NBR ISO 4288 (ABNT, 2008).

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

Existem dois sistemas para avaliação da rugosidade, sendo que o Sistema M é o utilizado no Brasil. Este adota a linha média como referência para o cálculo dos parâmetros de rugosidade. O uso desta referência se faz necessário porque a metrologia que controla superfícies não mede a dimensão de um corpo como a metrologia dimensional, mas os desvios em relação a uma forma ideal (NOVASKI, 2013).

De acordo com a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) a linha média é uma linha disposta paralelamente à direção do perfil, dentro do percurso de avaliação L_m , de modo que a soma das áreas superiores seja exatamente igual à soma das áreas inferiores. Na Figura 2.3, a linha média está representada apenas em um comprimento de avaliação L_e . As variáveis $A1$, $A2$ e $A3$ e $A4$ são as áreas relativas das porções superiores e inferiores apresentadas.

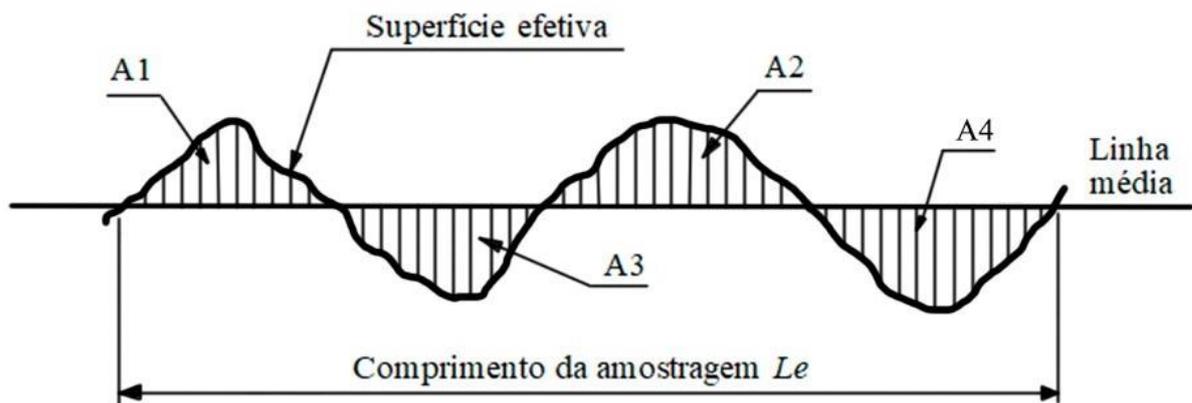


Figura 2.3 – Representação da linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977). Adaptada.

Para introduzir as fórmulas de cálculo dos parâmetros de rugosidade mencionados, é importante abordar os conceitos de pico de perfil, vale de perfil e elemento de perfil.

Pico de um perfil é uma parte do perfil avaliado dirigida para fora do material conectada a dois pontos adjacentes da interseção do perfil com o eixo X . O conceito de vale de um perfil se assemelha ao do pico, exceto pelo fato de que ele é uma parte do perfil direcionada para dentro, ou seja, do meio ambiente para a peça. A um pico e um vale adjacentes, dá-se o nome de elemento de perfil, conforme a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

As alturas dos picos e as profundidades dos vales são medidas com base no eixo Z das ordenadas. A Figura 2.4 contém um elemento de perfil, cuja altura é Z_t e o comprimento é X_s . A altura do pico de perfil é expressa por Z_p e a profundidade do vale de perfil adjacente é dada por Z_v .

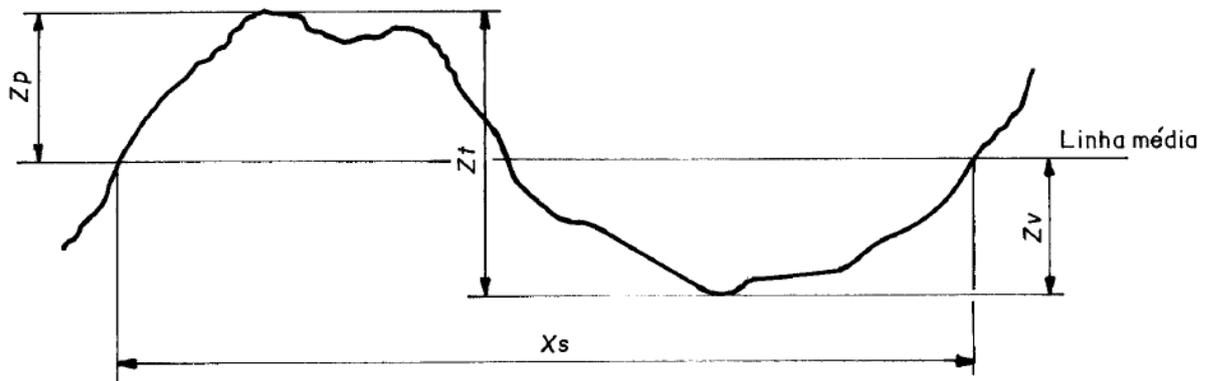


Figura 2.4 – Elemento de um perfil, conforme NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

Após a determinação da linha média e dos valores relativos aos picos e vales do perfil de rugosidade, é possível calcular os parâmetros que fornecem informações específicas. Neste trabalho, serão avaliados os seguintes parâmetros de rugosidade: R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$. Os parâmetros R_p , R_v , R_z e R_t são classificados como de amplitude relativos aos picos e vales, enquanto o R_a e R_q são parâmetros de amplitude relativos à média das ordenadas. O parâmetro $R\Delta q$ é considerado híbrido por relacionar dados relativos à amplitude e ao espaçamento.

O parâmetro R_p (altura máxima do pico do perfil) consiste na maior altura dos picos no comprimento de amostragem (Fig. 2.5) e o R_v (profundidade máxima do vale do perfil) consiste na maior profundidade dos vales, também considerando o comprimento de amostragem (Fig. 2.6).

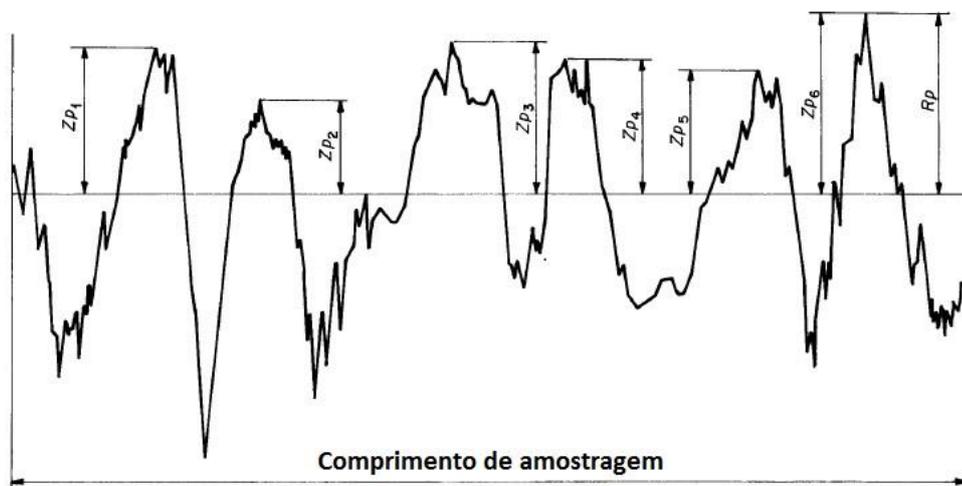


Figura 2.5 – Altura máxima do pico do perfil, como apresentada pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

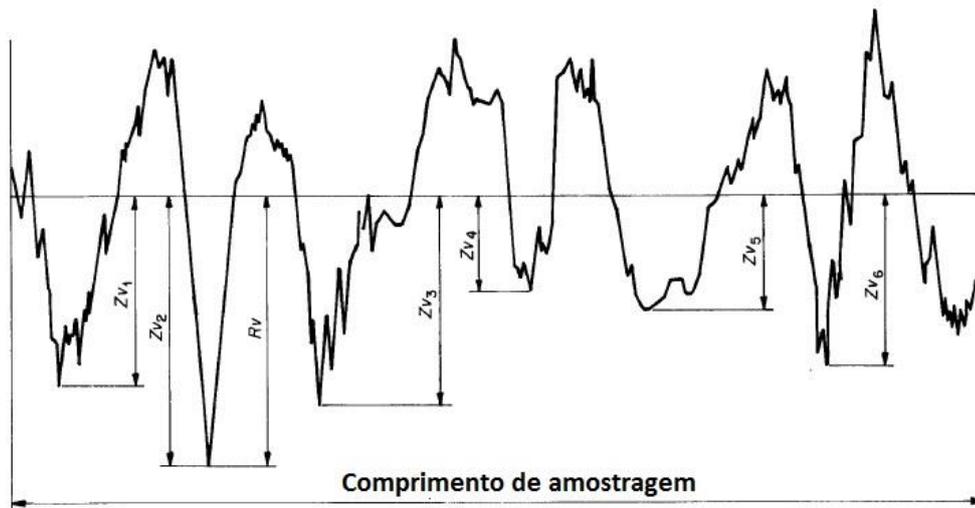


Figura 2.6 – Profundidade máxima do vale do perfil, conforme a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

Os parâmetros R_z (altura máxima do perfil) e R_t (altura total do perfil) são calculados de forma similar, pois ambos são a soma da altura do maior pico e da profundidade do vale mais profundo. A diferença entre eles é que o R_z é calculado considerando-se o comprimento de amostragem (Fig. 2.7) enquanto que, para o R_t , considera-se o comprimento de avaliação.

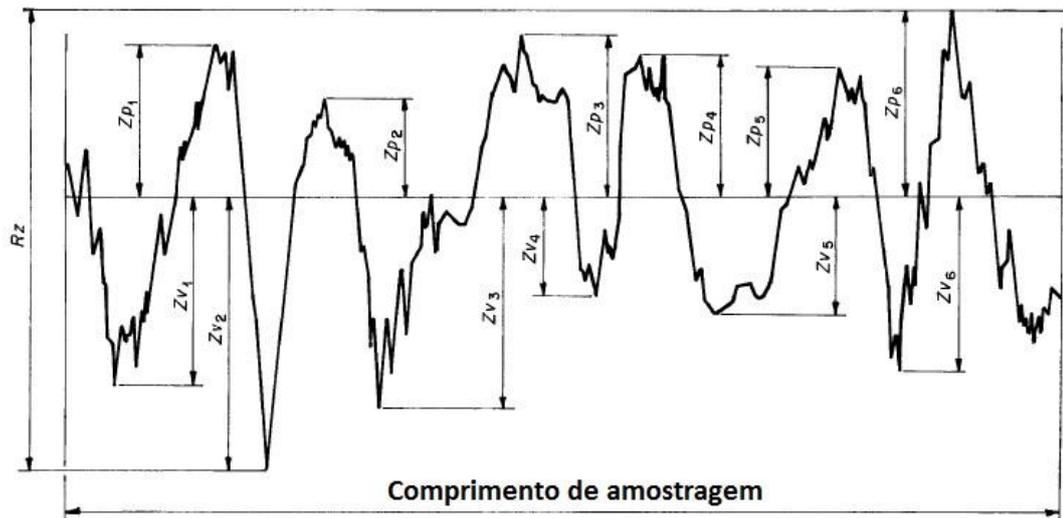


Figura 2.7 – Altura máxima do perfil, como apresentada pela NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

O R_a (desvio aritmético médio do perfil avaliado) consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem. Ele é obtido por meio da Eq. (2.1).

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad , \text{ com } l_r = L_e \quad (2.1)$$

Apesar do parâmetro Ra representar o valor médio da rugosidade de um determinado perfil, ele não é capaz de fornecer informações sobre o formato e dimensão dos picos e vales e o espaçamento entre eles. A Figura 2.8 mostra que perfis completamente diferentes podem apresentar o mesmo valor de Ra .

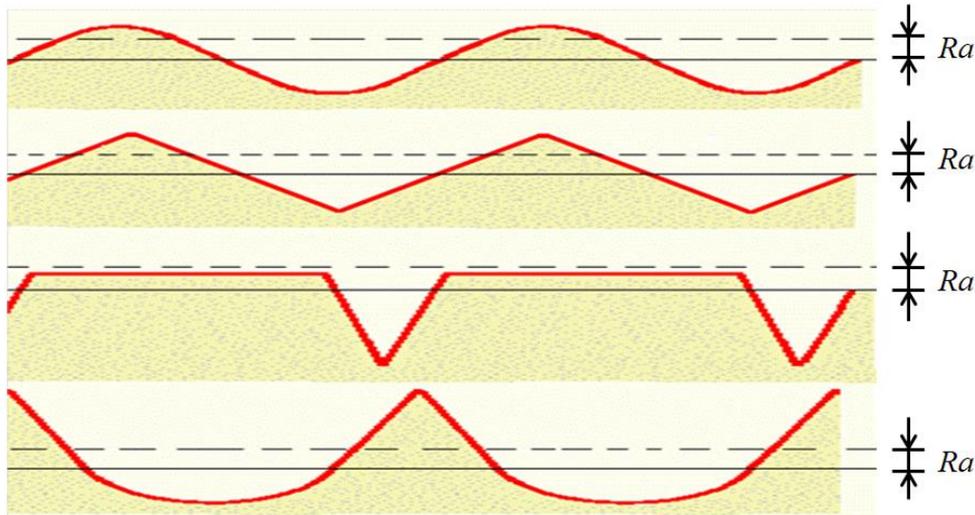


Figura 2.8 – Representação do parâmetro Ra para diferentes perfis (TAYLOR HOBSON, 2003).

A forma de cálculo do parâmetro Rq (desvio médio quadrático do perfil avaliado) é semelhante à do Ra . A diferença básica é que para o Rq deve-se extrair a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas $Z(x)$ elevados ao quadrado, considerando o comprimento de amostragem. Estima-se o valor de Rq pela Eq. (2.2).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad , \text{ com } l_r = L_e \quad (2.2)$$

O parâmetro $R\Delta q$ (inclinação quadrática média do perfil avaliado) consiste na raiz quadrada da média das inclinações, dZ/dX , no comprimento de amostragem. Por ser um

parâmetro híbrido, o $R\Delta q$ relaciona a altura e o comprimento dos elementos de perfil. A Figura 2.9 mostra as inclinações em alguns pontos de um elemento de perfil.

De acordo com Nakar, Harel e Hirsch (2018), apesar da inclinação não ser comumente avaliada nas indústrias que realizam o tratamento de superfícies em escalas maiores, ela é importante em aplicações que exigem precisão, como as que envolvem desgaste por contato, atrito e vedação. Além disso, Nakar e Feuermann (2016) abordaram as limitações da utilização de parâmetros de amplitude apenas na avaliação de superfícies muito macias com Ra menor que $0,2 \mu\text{m}$.

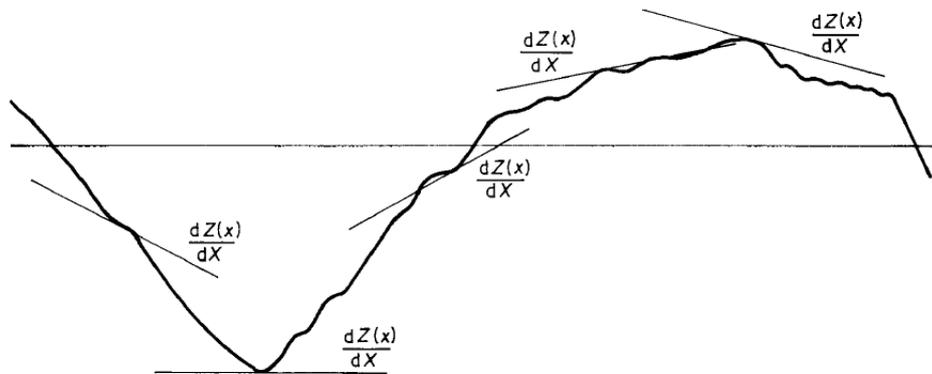


Figura 2.9 – Inclinações em alguns pontos de um elemento de perfil, conforme a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

Além dos parâmetros de rugosidade apresentados, neste trabalho será obtida a curva de *Abbott-Firestone* relativa a alguns perfis de rugosidade (Fig. 2.10). 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 %.

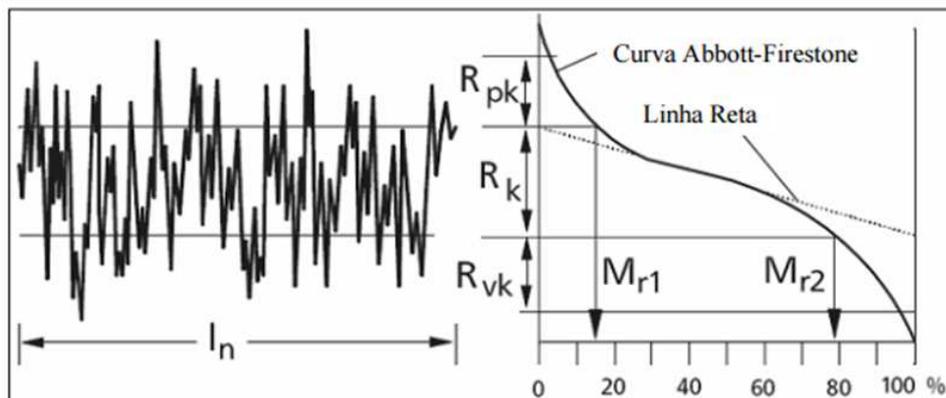


Figura 2.10 – Curva de *Abbott-Firestone* (TAYLOR HOBSON, 2000).

Para a caracterização de superfícies brunidas, a curva de *Abbott-Firestone*, obtida a partir da razão de material da superfície do perfil em função da profundidade, é comumente empregada. De acordo com Arola, Yang e Stoffel (2001), muitos parâmetros de rugosidade são derivados dela, como os parâmetros da família *Rk* (*Rk* - rugosidade do núcleo do perfil, *Rpk* - região de pico e *Rvk* - região de vale) e as duas fronteiras, que são *Mr1* (razão de material dos picos) e *Mr2* (razão de material dos vales).

O parâmetro *Rk* quantifica a taxa de desgaste de superfícies em contato e está associado à parte intermediária do perfil de rugosidade que afeta a resistência mecânica e a resistência ao carregamento (STOUT et al., 1993). O parâmetro *Rpk* representa o valor de rugosidade média dos picos que estão acima da área de mínimo contato do perfil (excluindo os picos de dimensões exageradas) e está associado com a região que desgasta nos primeiros contatos entre as superfícies. Por outro lado, o parâmetro *Rvk* representa o valor de rugosidade média dos vales que estão abaixo da área de contato do perfil (excluindo os vales de dimensões exageradas). Esse último parâmetro está associado à capacidade da superfície de reter fluidos lubrificantes (MITUTOYO, 2016).

2.1.1 Métodos de medição de rugosidade

Os métodos de medição de rugosidade são classificados como com contato ou sem contato. Enquanto as medições por contato envolvem a utilização de um apalpador cuja ponta toca a superfície da peça, as medições sem contato são baseadas nos princípios de imagem ou de microscopia (CHAND et al., 2011).

A medição da rugosidade é geralmente efetuada usando métodos de medição com contato (BUHSHAN, 2000; CHAND et al., 2011; NOVASKI, 2013). De acordo com Leach (2014), os instrumentos de medição com contato são, sem dúvida, os instrumentos mais comuns para medir a rugosidade atualmente. Nessas medições, a ponta do apalpador faz a varredura da superfície fornecendo o perfil de rugosidade (CHAND et al., 2011). Nesses casos, um sensor indutivo ou piezelétrico converte o movimento vertical do apalpador em sinais elétricos (LEACH, 2014).

O rugosímetro eletromecânico é um dos principais equipamentos utilizados nas medições com contato (LEACH, 2014). As medições sem contato são comumente realizadas por meios de equipamentos de interferometria, indução ou força atômica (DOBES et al., 2017). As Figuras 2.11 e 2.12 mostram um equipamento de medição de rugosidade com contato e um equipamento de medição sem contato, respectivamente.



Figura 2.11 – Rugosímetro eletromecânico do fabricante Mitutoyo.



Figura 2.12 – Interferômetro de luz branca do fabricante Mitutoyo.

Existem muitas diferenças entre os equipamentos de medição com contato e sem contato. Além da portabilidade característica de grande parte dos instrumentos de medição com contato, os preços dos equipamentos que realizam medições sem contato são consideravelmente mais elevados (LEACH, 2014). Como vantagem de se utilizar um equipamento de medição sem contato está a preservação das regiões avaliadas, uma vez que os apalpadores dos equipamentos de medição de rugosidade com contato deformam ou riscam o material da peça ou componente mecânico (DOBES et al., 2017).

2.1.2 Efeito do raio da ponta na medição de rugosidade com contato

Com relação às dimensões da ponta do apalpador, Leach (2014) afirmou que em superfícies caracterizadas por vales profundos e estreitos, a ponta do apalpador pode não ser capaz de atingir os pontos mais baixos do perfil. Quanto maior o raio de ponta utilizado, menor é a penetração obtida, o que torna os valores de rugosidade medidos menores do que os reais.

De acordo com Leach (2014), quando a ponta do apalpador passa por um pico, sua trajetória tende a ser mais arredondada do que a geometria do pico. Isso faz com que, nos perfis de rugosidade levantados, os picos aparentem ser mais arredondados do que eles realmente são. Também nesse caso, quanto maior o raio da ponta, maior é a distorção provocada. Apesar disso, a altura do pico medida pelo equipamento tende a ser equivalente ao valor da altura real.

Yoshida e Tsukada (2006) mencionaram que apesar dos métodos de medição de rugosidade por contato serem amplamente utilizados, as pontas dos apalpadores atuam como filtros mecânicos, o que faz com que os perfis de rugosidade levantados apresentem distorções em relação aos perfis reais. A Figura 2.13 ilustra a trajetória hipotética da ponta do apalpador e a linha tracejada descreve o seu comportamento ao passar pelos picos e vales do perfil de rugosidade.

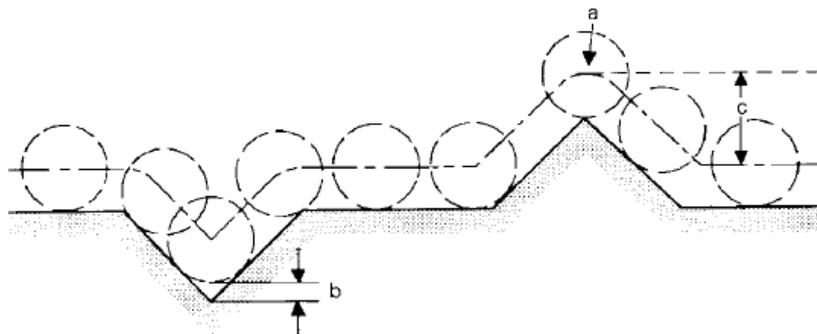


Figura 2.13 – Efeitos provocados pela geometria da ponta do apalpador no perfil de rugosidade medido (LEACH, 2014).

Na Figura 2.13, tem-se que:

- a: indica o arredondamento do pico provocado pelo efeito do raio da ponta do apalpador;
- b: é a diferença entre a profundidade real do vale e a profundidade medida;

- c : é a altura medida do pico, que corresponde a sua altura real.

Song et al. (2014) citaram o fato de que o aumento do raio da ponta do apalpador pode reduzir o valor do parâmetro Ra estimado, uma vez que a ponta não toca a superfície dos vales nas regiões mais profundas. O autor também afirmou que muitos laboratórios de metrologia não efetuam a correção dos valores de rugosidade medidos devido ao raio da ponta do apalpador. Esse procedimento é fundamental para se comparar os resultados das medições realizadas com pontas de raios diferentes. Muitas vezes, são observadas diferenças significativas entre os valores de rugosidade obtidos, que poderiam ser reduzidas caso a correção adequada fosse aplicada.

Para minimizar a influência da ponta do apalpador nas medições de rugosidade, a NBR ISO 3274 (ABNT, 2008) especifica que a ponta de apalpação deve ter formato de um cone de ponta esférica. As dimensões especificadas para o raio de ponta são $2\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ ou $10\ \mu\text{m}$ e os valores do ângulo de cone aceitáveis são de 60° ou 90° (Fig. 2.14).

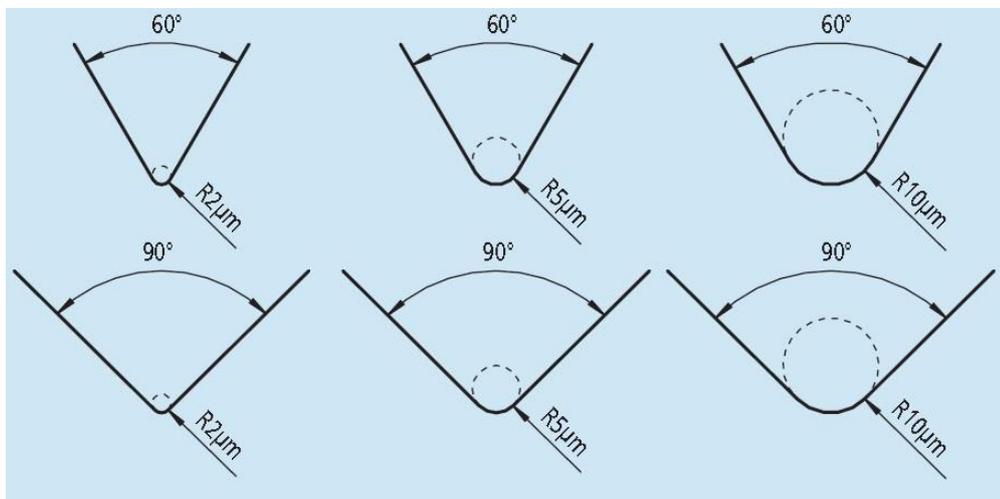


Figura 2.14 – Diferentes combinações de raio de ponta e ângulo de cone dos apalpadores para medição de rugosidade (MITUTOYO, 2016).

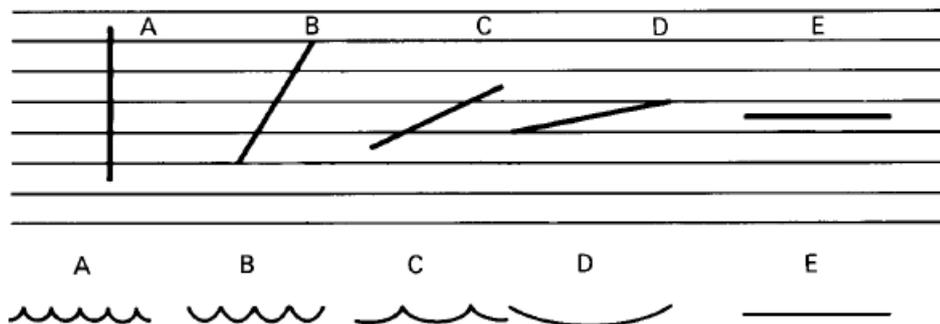
2.1.3 Demais fontes de erro na medição de rugosidade com contato

Além do raio da ponta do apalpador, outras fontes de erro que podem afetar o resultado da medição com contato da rugosidade superficial são: direção de medição, vibrações mecânicas, características dos filtros, dimensão e geometria da ponta do apalpador e força de medição aplicada. Além deles, relacionados especificamente aos equipamentos utilizados na

medições estão a velocidade transversal do apalpador e a taxa de aquisição de dados do rugosímetro.

Com relação à direção de medição, considera-se correta a medição realizada de forma perpendicular aos sulcos deixados pelas ferramentas de usinagem na peça caso estes sejam nítidos e com direção definida. Desta forma, garante-se que o maior valor de rugosidade será obtido. Nos casos em que os sulcos não são visíveis, é necessário realizar medições em diversas direções e considerar o máximo valor de rugosidade indicado como o valor correto (LEACH, 2014).

A Figura 2.15 mostra a importância da escolha adequada da direção de medição nas medições de rugosidade. Caso os sulcos presentes na superfície da peça não estejam perpendiculares ao perfil medido, tem-se a falsa impressão de que os valores de rugosidade são menores que os reais.



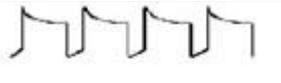
2.15 – Perfis de rugosidade obtidos para diferentes direções de apalpamento (LEACH, 2014).

Pela rugosidade superficial se tratar de uma grandeza que assume valores médios na ordem de poucos micrometros, ou até mesmo de décimos ou centésimos de micrometros, qualquer fonte que interfira minimamente na posição do apalpador é capaz de distorcer os resultados e os perfis de rugosidade levantados.

Quando existe vibração mecânica no ambiente da medição, os valores de rugosidade coletados tendem a ser afetados. Devido a esse fato, aconselha-se realizar todas as medições em ambiente isolado. Dobes et al. (2017) estudou o efeito da vibração na medição de amostras de diferentes materiais, a saber: alumínio, aço inoxidável e aço carbono. Ao induzir vibrações mecânicas nas frequências de 60, 80 e 100 Hz, os autores concluíram que em 80 Hz foram coletados os maiores valores de rugosidade referentes à amostra com melhor acabamento superficial.

A utilização de filtros digitais é comum quando se pretende separar diferentes frequências em um determinado perfil (RAJA et al., 2002). No entanto, é importante ressaltar que os filtros usados para separar o perfil de rugosidade do perfil de ondulação e das componentes de frequências mais baixas podem também introduzir erros significativos nas medições. Diferentes tipos de filtros geram perfis distintos, como pode ser constatado na Tab. 2.2, apresentada por Oliveira (2004).

Tabela 2.2 - Efeito de diferentes tipos de filtro nas análises do perfil de rugosidade (OLIVEIRA, 2004).

A	Sem filtro	
B	Filtro ISO 2CR	
C	Filtro gaussiano	

Na Tabela 2.2, observa-se que o filtro ISO 2CR introduz picos que não existem no perfil real. Por outro lado, o filtro gaussiano atua no sentido de amenizar a amplitude do sinal dando mais suavidade aos contornos da superfície (WHITEHOUSE, 1994). Com isso, ele se torna capaz de remover falsos picos da análise, como aqueles provenientes da existência de poros na superfície da peça.

A força de medição estática exercida pelo apalpador sobre a peça nas medições com contato, que é fixada em 0,75 mN pela NBR ISO 3274 (ABNT, 2008) também é uma possível fonte de erros a ser considerada. Não é viável utilizar forças maiores no processo de medição, pois o material da peça poderá se deformar plasticamente ou ser sulcado. Por outro lado, o uso de forças muito baixas pode fazer com que a ponta do apalpador não mantenha o devido contato com a peça durante as medições, o que resulta na indicação de valores de rugosidade incorretos (LEACH, 2014).

Dobes et al. (2017) identificaram o sulcamento provocado por uma ponta de diamante de raio de 2 μm durante a medição de uma amostra de alumínio. A imagem da superfície obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) é mostrada na Fig. 2.16.

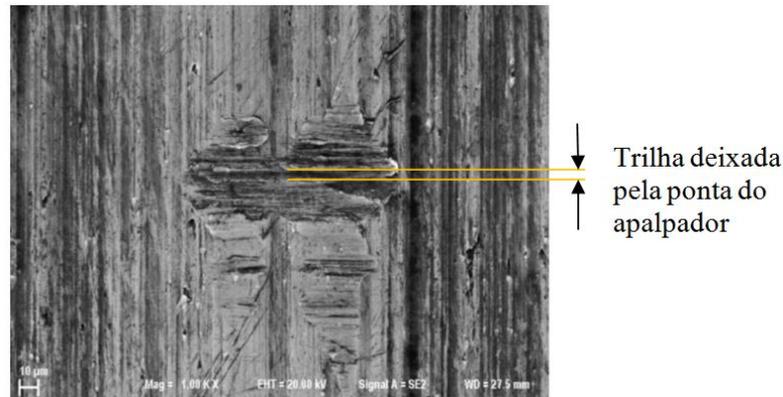


Figura 2.16 – Sulcamento em amostra de alumínio torneada provocada pela medição com rugosímetro eletromecânico (DOBES et al., 2017).

Mesmo a olho nu é possível observar riscos nas superfícies de peças constituídas por materiais dúcteis ou de reduzido módulo elástico. Esse é o caso de alguns aços, prata, ouro, chumbo, polímeros e elastômeros (BHUSHAN, 2000; POON, BHUSHAN, 1995).

Poon e Bhushan (1995) realizaram um estudo para avaliar os resultados das medições de rugosidade de um substrato de vidro-cerâmica obtidos através de um medidor por contato com apalpador, um microscópio de força atômica e um medidor óptico. Na medição por contato, foram adotadas duas condições distintas, a saber: *i*) raio de ponta do apalpador igual a $5\ \mu\text{m}$ e força estática equivalente a uma ponta de massa $9\ \text{mg}$; *ii*) raio de ponta do apalpador igual a $0,1\ \mu\text{m}$ e carga estática de $1\ \text{mg}$.

Durante os testes referentes à condição *ii*, os autores constataram que a amostra ensaiada exibiu uma deformação plástica significativa, o que invalidava os dados de rugosidade coletados. Para reduzir esse efeito, optou-se por alterar o raio da ponta para $0,2\ \mu\text{m}$ e reduzir a força aplicada para um valor relativo a $0,5\ \text{mg}$. Deste modo, a deformação experimentada pelo material foi consideravelmente menor. Os novos resultados de rugosidade coletados foram aceitos para os propósitos da pesquisa.

Ao abordar sobre as fontes de incerteza na medição de rugosidade por contato, Leach (2014) discorreu a respeito da deformação plástica experimentada pelo material da peça ou da amostra avaliada. Devido à dificuldade de se estimar a contribuição deste fator para a incerteza final, o autor sugeriu considerar $20\ \text{nm}$ como um valor conservativo para a deformação experimentada pelos metais, desde que se utilize uma ponta de raio $2\ \mu\text{m}$ e força de medição estática equivalente a $0,75\ \text{mN}$.

2.2 Fundamentos de Usinagem

De acordo com Ferraresi (1970), as operações de usinagem são aquelas que conferem a forma, as dimensões, o acabamento, ou uma combinação qualquer destes três itens à peça, produzindo cavaco. O autor definiu cavaco como uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

Os processos de usinagem podem ser classificados como processos convencionais ou processos especiais (não-convencionais). Os processos convencionais são aqueles que empregam energia mecânica na remoção do material nas operações de corte, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça (SOUZA, 2011).

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos dos processos de fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional.

2.2.1 Fresamento frontal

O fresamento é considerado uma operação de corte com ferramenta de geometria definida, ou seja, arestas cortantes com formato e dimensões conhecidos (SOUZA, 2011). É um processo destinado à obtenção de superfícies, por meio da utilização de ferramentas geralmente multicortantes.

Existem dois tipos básicos de fresamento: frontal (de topo) e tangencial (SOUZA, 2011). A diferença básica entre eles consiste no posicionamento da ferramenta em relação à superfície da peça a ser usinada. No fresamento frontal, o eixo da ferramenta permanece na direção perpendicular à superfície, enquanto no fresamento tangencial a superfície fica paralela ao eixo de rotação da ferramenta.

Todos os processos de usinagem exigem a seleção correta de diversos parâmetros, com base nas características do material a ser usinado e nas características desejadas para o produto final. A escolha correta do material a ser usinado, das ferramentas, equipamento e condições de usinagem proporcionam vantagens econômicas consideráveis. Além disso, os custos e tempos de produção podem ser significativamente reduzidos através da escolha adequada desses parâmetros (TESSLER, BARBOSA, 1993).

Os parâmetros de corte dos processos de usinagem são as grandezas que devem ser ajustadas direta ou indiretamente na máquina-ferramenta para a retirada do cavaco. Dentre elas, destaca-se o avanço (geralmente simbolizado por f) definido como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso e a profundidade de corte (simbolizado por a_p) definida como

a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho (FERRARESI, 1970).

No fresamento, o avanço representa a distância linear percorrida pela fresa durante uma rotação completa da mesma. A profundidade de corte corresponde ao quanto a ferramenta penetra na peça, considerando apenas a direção do eixo da fresa. Os parâmetros de corte estão relacionados com diversas características dos processos de usinagem como, por exemplo, a forma do cavaco produzido. O avanço é o parâmetro mais influente na determinação da forma do cavaco e a profundidade de corte o de menor influência. A Figura 2.17 mostra o efeito do avanço e pela profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989).

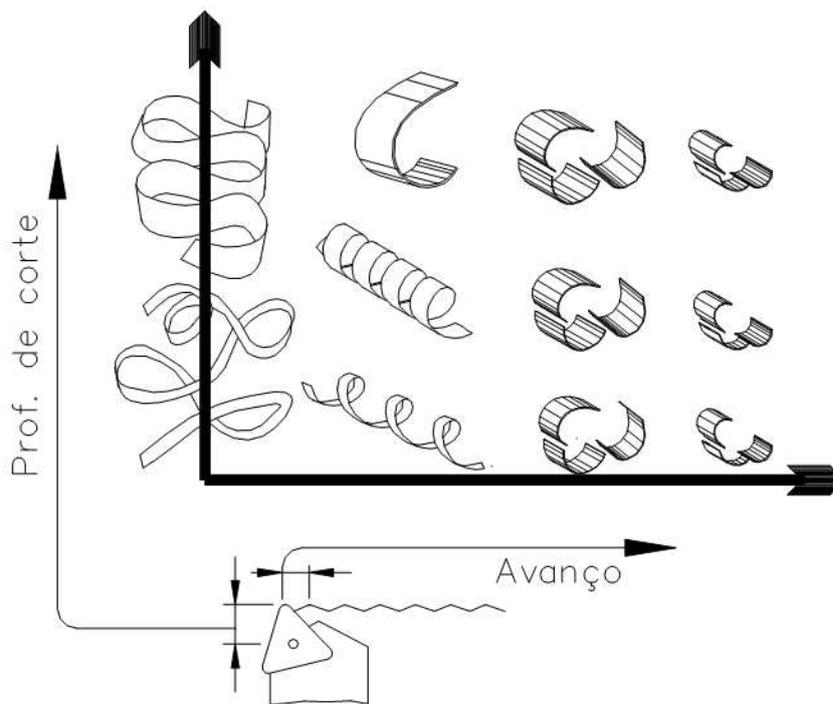


Figura 2.17 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989).

É preciso ajustar os parâmetros de corte de maneira adequada também para se obter um valor de rugosidade superficial específico. O conhecimento a respeito das propriedades da ferramenta a ser utilizada, das características da máquina e do material usinado é de fundamental importância para o êxito da operação.

2.2.2 Mandrilamento

O mandrilamento é um processo de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas de barra. Para isso, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada (FERRARESI, 1970). O processo de mandrilamento possibilita a ampliação ou acabamento de furos realizados por meio do processo de furação, furos fundidos na peça e componentes forjados ou extrudados. Ele é mais utilizado em aplicações nas quais o bom acabamento da superfície interna é requerido ou quando as tolerâncias de projeto são apertadas (DALO, 2011).

De acordo com Ferraresi (1970), os principais tipos de mandrilamento são: cônico, cilíndrico, radial e de superfícies especiais. O mandrilamento cônico é um processo no qual a superfície usinada é cônica de revolução e seu eixo coincide com aquele em torno do qual gira a ferramenta, conforme apresentado na Fig. 2.18(a). Já no mandrilamento cilíndrico, o eixo da superfície cilíndrica de revolução coincide com o eixo em torno do qual gira a peça (Fig. 2.18(b)).

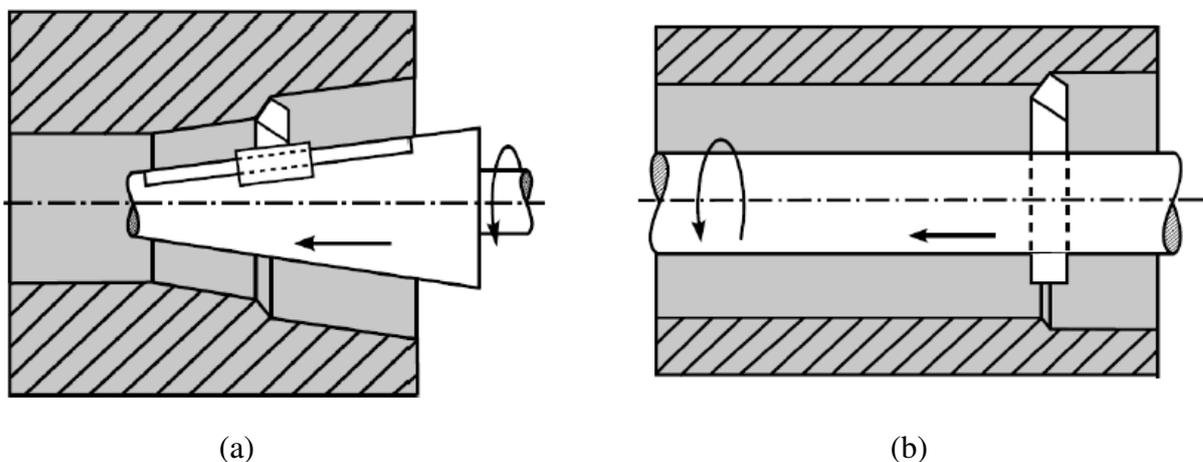


Figura 2.18 – Processo de mandrilamento cônico (a) e processo de mandrilamento cilíndrico (b) (FERRARESI, 1970).

No mandrilamento radial, a superfície usinada é plana e perpendicular ao eixo em torno do qual gira a ferramenta, como exibido na Fig. 2.19(a). Por fim, no mandrilamento de superfícies especiais, a superfície usinada é uma superfície de revolução, diferente das demais, cujos eixos coincidem com o eixo em torno do qual gira a ferramenta (Fig. 2.19(b)).

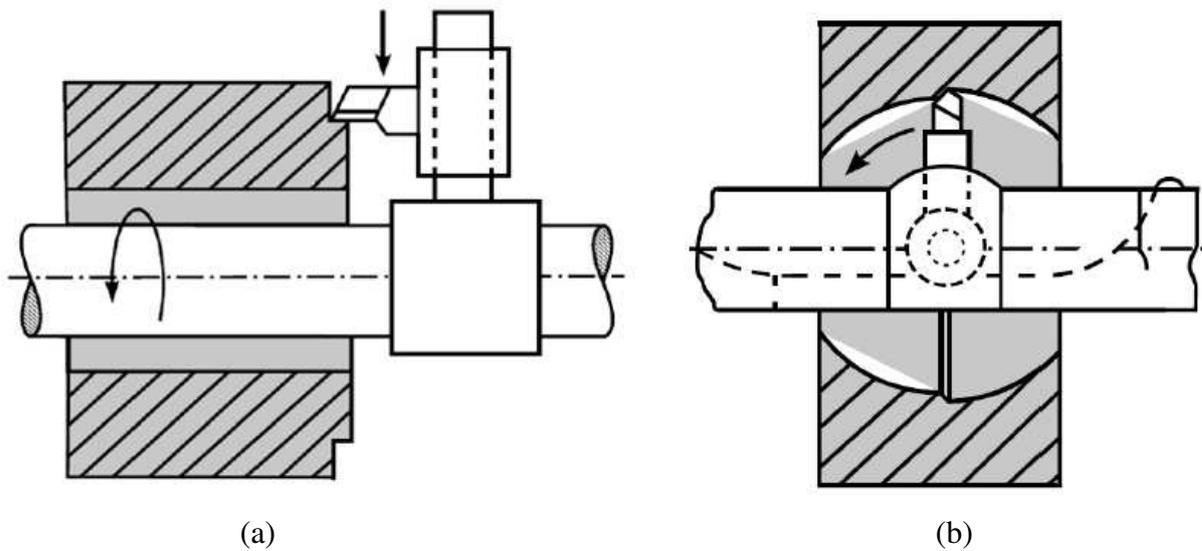


Figura 2.19 – Processo de mandrilamento radial (a) e processo de mandrilamento de superfícies especiais (b) (FERRARESI, 1970).

Como no processo de torneamento, a força de usinagem no mandrilamento pode ser decomposta em força de corte, força de avanço e força passiva. Ainda, a geometria e as condições de corte influenciam diretamente nos no módulo e direção das forças resultantes (GODINHO, 2007). Assim sendo, é importante selecionar o tipo de ferramenta e as condições de corte apropriadas para cada operação a ser realizada.

2.2.3 Brunimento convencional

O brunimento convencional é um processo de usinagem utilizado para produzir, de forma econômica, furos de alta precisão no que diz respeito à geometria e qualidade superficial. É uma operação basicamente utilizada no acabamento final de peças que utilizam funcionalmente a superfície cilíndrica gerada. Por propiciar uma boa capacidade de retenção de lubrificantes, o brunimento é recomendado para aplicações de guias cilíndricas para peças móveis, como bloco de motores, cilindros de compressores, cilindros hidráulicos e componentes de sistemas de injeção diesel (BÄHRE, SCHMITT e MOOS, 2012).

No processo de brunimento, remove-se material por meio da penetração gradativa de grãos abrasivos na peça combinado com os movimentos simultâneos de avanço e rotação da ferramenta abrasiva, conforme mostrado na Fig. 2.20(a). Esta operação é normalmente conduzida a baixas rotações, o que faz com que o material seja removido devido à ação cisalhante dos grãos aglomerados da pedra de brunimento, com pouco aumento da temperatura da peça (AARON, 1995).

Andretta (2001) afirmou que o brunimento permite a remoção rápida e econômica de partículas, com aquecimento e distorção mínima, além da geração de superfícies circunferenciais e de corte retilíneo. Os desvios geométricos anteriores à operação são corrigidos e, desta forma, obtém-se o acabamento desejado da superfície, com boa qualidade dimensional.

O movimento de rotação e de avanço do cabeçote brunidor descreve na peça usinada trajetórias helicoidais, gerando marcas em formato de hachurado com traços entrelaçados, que são exibidas na Fig. 2.20(b). As ranhuras geradas pelo processo de brunimento assumem a função de reter óleo na parede do cilindro e o ângulo de cruzamento das ranhuras é especificado a fim de garantir a correta lubrificação do sistema pistão-cilindro.

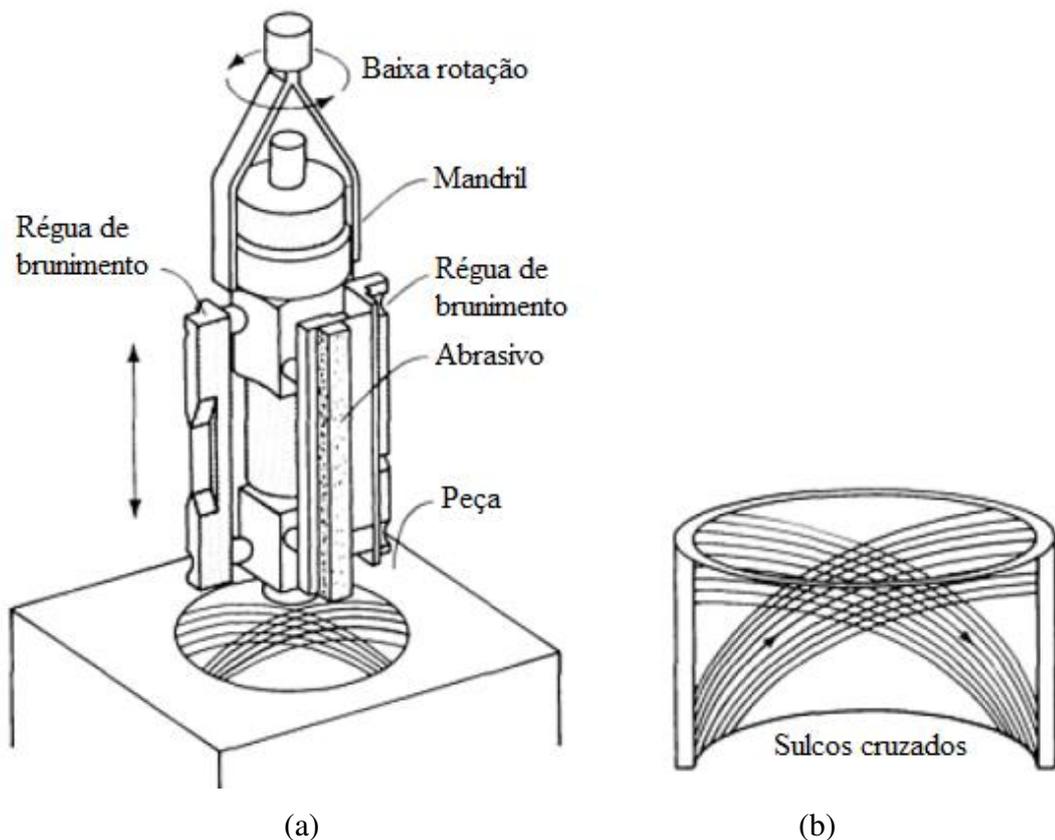


Figura 2.20 – Direções de corte no brunimento convencional (a) e superfície com sulcos gerada pelo processo (b) (AARON, 1995).

Os principais parâmetros de usinagem relacionados ao brunimento são: pressão de contato entre os abrasivos e a peça, rotação e velocidade de avanço da ferramenta, tipo de

fluido de corte utilizado, tipo de abrasivos ou pedras de brunimento, tipo de ligante, tamanho do grão abrasivo, concentração de abrasivos e rigidez da ferramenta.

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

De acordo com Klocke (2009) e Odebrecht (2003), a formação de cavaco no processo de usinagem com ferramentas que utilizam grãos abrasivos agrupados por um ligante ocorre inicialmente pela penetração da aresta de corte do grão abrasivo na peça. Após a fase de deformação elástica, inicia-se a deformação plástica. O material da peça é então forçado para os lados, formando uma espécie de rebarba. Além disso, esse material pode também ser forçado para debaixo da aresta na direção da superfície de incidência. O cavaco inicia a sua formação no momento em que o grão penetra na peça na profundidade T_μ (Fig. 2.21). Enquanto ocorre a formação do cavaco, uma parte do material continua sendo forçado para as laterais.

A espessura efetiva de corte ($h_{cu\ eff}$) determina a eficiência da remoção do material, uma vez que nem todo material deformado, representado pela espessura (h_{cu}), é transformado em cavaco.

Ainda, na Fig. 2.21 tem-se que:

- F_n : força normal à superfície de contato;
- F_t : força tangencial à superfície de contato;
- v_c : velocidade de corte;
- η : ângulo da direção efetiva.

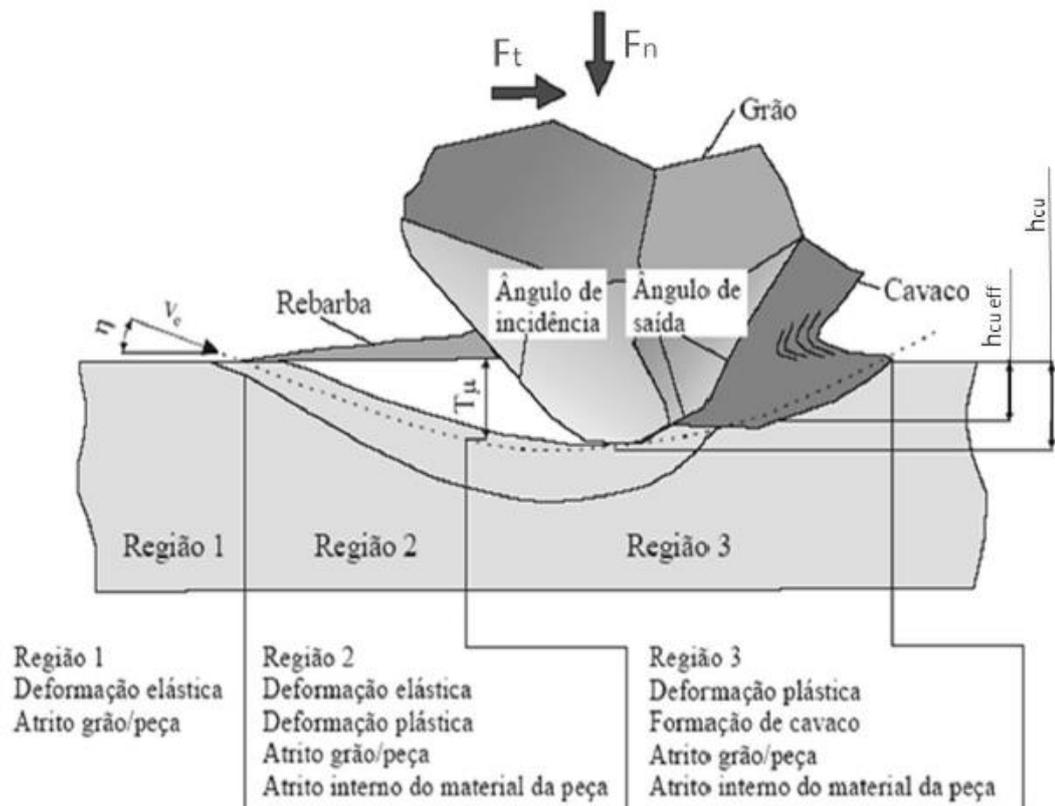


Figura 2.21 – Regiões de formação elástica e plástica na formação de cavaco (ODEBRECHT, 2003).

2.3 Incerteza de Medição

De acordo como Vocabulário Internacional de Metrologia, incerteza de medição consiste em um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (INMETRO, 2012). Assim sendo, ela é empregada para indicar a qualidade de uma medição.

Valores baixos de incerteza indicam que o valor verdadeiro de uma grandeza está bem próximo do valor indicado pelo instrumento de medição. À medida a incerteza aumenta, passamos a ter valores possíveis do mensurando mais distantes da indicação oferecida, o que comumente leva os operadores a refletirem sobre a eficácia do método de medição empregado, além das condições do ambiente e demais fatores que poderiam interferir no processo.

Existem métodos padronizados para a estimativa da incerteza de medição que são utilizados por profissionais e pesquisadores de todo o mundo. O mais conhecido deles é o

método GUM, descrito no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), publicado pela ISO (*International Organization for Standardization*) em parceria com outras organizações.

Utilizando o método GUM é possível estimar a incerteza em diversos processos de medição. No entanto, quando os cálculos são muito complexos para serem efetuados analiticamente, emprega-se o método de Monte Carlo, que se baseia em simulações computacionais e se tornou popular devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores pessoais.

O método de cálculo de incerteza de medição apresentado no GUM tem como base a definição das variáveis que exercem alguma influência sobre o processo de medição. Para obter o valor da incerteza, deve-se, portanto, conhecer a respeito das fontes que, direta ou indiretamente, fazem com que a indicação do sistema de medição não corresponda exatamente ao valor verdadeiro do mensurando.

Nesse caso, adota-se um modelo matemático que combina todas as variáveis e estabelece as relações entre elas. Nos casos mais simples, o modelo consiste na soma algébrica de cada variável de influência identificada.

Cada variável possui sua incerteza-padrão $u(x)$ associada, sendo essas incertezas caracterizadas por apresentarem probabilidade de abrangência igual a 68,27 %. Como a obtenção dos valores das variáveis de influência pode ocorrer de formas distintas, as avaliações das incertezas são classificadas como Tipo A ou Tipo B.

A avaliação do Tipo A é empregada quando é possível realizar uma análise estatística da variável analisada. Nesse caso, calcula-se a média e o desvio padrão de uma amostra de valores disponíveis, sendo o desvio padrão utilizado na equação para obtenção da incerteza-padrão (Eq. 2.3). É válido destacar que as variáveis que são avaliadas desta maneira possuem uma distribuição de probabilidade normal ou t de *Student*.

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.3)$$

Em que:

- s : desvio padrão das leituras efetuadas;
- n : número de leituras efetuadas.

A variabilidade das leituras efetuadas para a determinação do valor do mensurando é um exemplo de variável de influência para a qual se aplica a avaliação do Tipo A. Como se recomenda efetuar no mínimo 5 leituras para determinar o valor de indicação fornecido por um sistema ou instrumento de medição, temos à disposição dados suficientes para a análise estatística requerida.

Já no caso da avaliação de incerteza do Tipo B, as informações sobre as variáveis de influência são obtidas em certificados de calibração ou manuais técnicos. Elas também podem ser especificações do fabricante do equipamento utilizado, dados de medições prévias ou conhecimento a respeito do processo de medição e do comportamento dos instrumentos.

Em se tratando das variáveis cuja avaliação é classificada como Tipo B, sabe-se que suas distribuições de probabilidade podem ser retangulares, trapezoidais ou triangulares. Isso depende basicamente da probabilidade de ocorrência dos valores que estão situados próximos ao valor médio. As distribuições de probabilidade mais comuns das referidas variáveis são a retangular e a triangular. As Equações 2.4 e 2.5 são utilizadas para o cálculo das incertezas padrão das variáveis que assumem as distribuições retangular e triangular, respectivamente.

$$u(x) = \frac{\textit{estimativa}}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

$$u(x) = \frac{\textit{estimativa}}{\sqrt{6}} \quad (2.5)$$

Após o cálculo das incertezas-padrão relativas às variáveis de influência, devemos combiná-las a fim de conhecer o valor que representa a incerteza do processo de medição avaliado. A incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é, portanto, o valor que representa a incerteza do processo, sendo também expressa com probabilidade de abrangência de 67,28 %. A incerteza-padrão combinada é obtida por meio da “lei de propagação de incertezas”, apresentada pela Eq. 2.6.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.6)$$

Em que:

- y : estimativa da variável resposta Y ;
- x_i : a estimativa da variável X_i ;
- $u^2(x_i)$: a variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N ;
- N : número de variáveis que afetam a variável resposta Y ;
- $u(x_i)$: a incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i ;
- $r(x_i, x_j)$: o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j .

Nos casos em que o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j assume valor nulo, a equação para determinação de $u_c^2(y)$ é simplificada, pois apenas o primeiro termo precisa ser calculado (Eq. 2.7).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.7)$$

Apesar da incerteza-padrão combinada englobar a contribuição de todas as variáveis do processo, sua probabilidade de abrangência de 68,27 %, correspondente a um único desvio padrão, é muito baixa para as aplicações relacionadas à engenharia mecânica. Devido a esse fato, é necessário elevar esse percentual para que a maioria dos valores situados ao redor da média aritmética seja considerada. Ao multiplicar o desvio padrão por 2, é obtida um nível de confiança de 95,45 % para a distribuição normal.

Esse novo percentual é mais adequado para os processos de medição dimensional, pois além de englobar uma ampla faixa de valores, não torna as aplicações tão onerosas quanto se buscássemos um nível de confiança de 100 %. Como o tamanho amostral dos processos de medição é normalmente menor que 30, é utilizada a distribuição t de *Student* ao invés da distribuição normal. Desta forma, o nível de confiança estabelecido para a expressão da incerteza de medição é arredondado para 95 %, o que facilita a extração de dados da tabela t de *Student*.

Por fim, conhecendo a probabilidade abrangência requerida e os graus de liberdade efetivos de uma medição, basta consultar a tabela da distribuição *t* de *Student* para estabelecer o fator de abrangência *k* que será utilizado para multiplicar a incerteza-padrão combinada. A Equação 2.8 contém a expressão para determinação dos graus de liberdade efetivos (v_{eff}), denominada equação de *Welch-Satterthwaite*, na qual v_i representa os graus de liberdade da variável x_i .

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.8)$$

Incerteza expandida (U_p) é o nome dado ao produto da incerteza-padrão combinada e do fator *k* estipulado (Eq. 2.9).

$$U_p = k \cdot u_c \quad (2.9)$$

Por fim, o resultado da medição deve ser expresso como a média aritmética das leituras realizadas com o instrumento ou sistema de medição, seguido do valor da incerteza expandida, que pode ser somada ou subtraída da média ($RM = \text{média aritmética} \pm U_p$, para um nível de confiança de 95 %). O valor da probabilidade de abrangência considerado para o cálculo da incerteza expandida e o fator de abrangência empregado também devem ser apresentados.

De acordo com Arencibia et al. (2019), são várias as razões que justificam todo o esforço destinado à avaliação da incerteza de medição. A seguir são apresentadas algumas delas:

a) A avaliação e declaração da incerteza são indispensáveis para efetuar a correta interpretação dos resultados de medição uma vez que incerteza é um parâmetro metrológico que indica a qualidade do resultado da medição e, portanto, permite tirar conclusões a esse respeito. Além disso, este é um dos requisitos técnicos exigidos pela ABNT NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017) para a garantia da rastreabilidade das medições.

b) Quando a incerteza é declarada para o resultado da medição, permite efetuar a comparação desses resultados com aqueles apresentados em uma especificação, norma técnica, artigo, dissertação ou tese, dentre outros.

c) A avaliação da incerteza permite identificar quais são os fatores de influência que contribuem de forma mais significativa para a indeterminação do resultado da medição. Uma vez identificados estes fatores é possível propor estratégias para minimizar seus efeitos.

2.4 Planejamento de Experimentos

As técnicas de planejamento e análise de experimentos são aplicadas com o intuito de melhorar a qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes requeridos em um determinado experimento e minimizar o uso de recursos das empresas (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

O planejamento, quando efetuado de maneira adequada, possibilita a identificação das variáveis de processo que exercem influência significativa sobre ele. Nos casos em que se tem um único fator com dois níveis é possível efetuar o tratamento estatístico dos dados por meio do teste de hipóteses para a diferença de duas médias considerando as variâncias desconhecidas ou da Análise de Variância (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

2.4.1 Teste de hipóteses para a diferença de duas médias considerando as variâncias desconhecidas (teste *t* combinado)

Os testes de hipóteses para a diferença de duas médias considerando as variâncias desconhecidas ou teste *t* combinado é uma técnica utilizada para comparar estatisticamente as médias de duas populações distintas, desde que a soma dos elementos das amostras analisadas não exceda 40.

Seja $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}$ uma amostra aleatória de n_1 observações proveniente da primeira população e $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n_2}$ uma amostra aleatória de n_2 observações provenientes da segunda população. Sejam $\bar{X}_1, \bar{X}_2, S_1^2$ e S_2^2 as médias e as variâncias das amostras 1 e 2, respectivamente.

Supondo que as variâncias populacionais σ_1^2 e σ_2^2 são desconhecidas, mas iguais a σ^2 , combinam-se as variâncias das amostras S_1^2 e S_2^2 para formar um estimador da variância σ^2 . O estimador combinado S_p^2 é definido conforme a Eq. 2.10.

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 1} \quad (2.10)$$

O estimador combinado S_p^2 tem $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade, pois a primeira amostra contribui com $n_1 - 1$ graus de liberdade e a segunda amostra contribui com $n_2 - 1$ graus de liberdade.

O teste de hipóteses acerca da diferença entre as médias μ_1 e μ_2 deve ser realizado. Nesse caso, as hipóteses estabelecidas são $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ e $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$; $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$ ou $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$. A hipótese H_0 é denominada hipótese nula, enquanto H_1 é denominada hipótese alternativa. Em seguida, é necessário encontrar um valor de t observado (t_{obs}) a ser comparado com o valor de t tabelado para um determinado nível de significância α adotado.

A Equação 2.11 contém a fórmula de cálculo do t_{obs} .

$$t_{obs} = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.11)$$

Nos casos em que se adota $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$, rejeita-se a hipótese H_0 se $|t_{obs}| > t_{\alpha/2}$. Quando $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$, a hipótese H_0 é rejeitada quando $t_{obs} > t_{\alpha}$. Finalmente, quando $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$, rejeita-se H_0 se $t_{obs} < -t_{\alpha}$. Em todas estas situações, os graus de liberdade assumem valor igual a $n_1 + n_2 - 2$.

Assim sendo, quando a hipótese H_0 é aceita através do teste de hipóteses, as médias comparadas não apresentam diferença significativa do ponto de vista estatístico, para o valor de α escolhido.

2.4.2 Análise de Variância (ANOVA)

Os dados característicos utilizados na Análise de Variância (ANOVA) são mostrados na Tab. 2.3. Eles podem ser descritos conforme o modelo linear estatístico apresentado por meio da Eq. 2.12.

Tabela 2.3 – Dados de um experimento com um único fator e a tratamentos.

Tratamento	Observações				Totais	Médias
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1m}	$y_{1\cdot}$	$\bar{y}_{1\cdot}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2m}	$y_{2\cdot}$	$\bar{y}_{2\cdot}$
...
a	y_{a1}	y_{a2}	...	y_{am}	$y_{a\cdot}$	$\bar{y}_{a\cdot}$
					$y_{\cdot\cdot}$	$\bar{y}_{\cdot\cdot}$

$$Y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2.12)$$

Em que:

- Y_{ij} : variável aleatória denotando a ij -ésima observação;
- μ_i : soma da média global (μ) e do efeito do i -ésimo tratamento (τ_i);
- ϵ_{ij} : componente do erro aleatório.

O tipo de planejamento exposto é chamado de planejamento experimental completamente aleatorizado, uma vez que as observações são tomadas em ordem aleatória e que o ambiente em que os tratamentos são utilizados é o mais uniforme possível. Nas análises efetuadas, existe o interesse de testar as igualdades dos a tratamentos $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_a$, o que é equivalente a testar as hipóteses (Eq. 2.13 e Eq. 2.14).

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (2.13)$$

$$H_1: \tau_i \neq 0, \text{ para no mínimo um } i \quad (2.14)$$

Se a hipótese nula (H_0) for verdadeira, cada observação consistirá na média global (μ) mais a concepção do componente do erro aleatório (ϵ_{ij}), o que significa que todas as m observações apresentam distribuição normal, com média μ e variância σ^2 . Em outras palavras, é possível afirmar que a alteração dos níveis do fator não exerce influência sobre a resposta média. Por outro lado, caso a hipótese alternativa H_1 seja verdadeira, no mínimo um efeito dos tratamentos exercem efeito na resposta.

A variabilidade total nos dados da amostra, descrita pela soma total dos quadrados SQ_T (Eq. 2.15), é dividida em dois componentes. Esses componentes consistem em $SQ_{Tratamentos}$, que é a soma dos quadrados das diferenças entre as médias dos tratamentos e a média global (Eq. 2.16), e SQ_E , que é a soma dos quadrados das diferenças entre as observações dentro de um tratamento e a média dos tratamentos (Eq. 2.17).

$$SQ_T = SQ_{Tratamentos} + SQ_E \quad (2.15)$$

$$SQ_{Tratamentos} = m \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}_{\cdot\cdot})^2 \quad (2.16)$$

$$SQ_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot})^2 \quad (2.17)$$

Em que:

- m : número de observações de cada tratamento, que devem ser iguais;
- y_{ij} : j -ésima observação sujeita ao i -ésimo tratamento;
- $\bar{y}_{\cdot\cdot}$: média global de todas as observações;
- $\bar{y}_{i\cdot}$: média das observações sujeitas ao i -ésimo tratamento.

Como $N = an$, é possível concluir que SQ_T possui $(am - 1)$ graus de liberdade. Já a soma $SQ_{Tratamentos}$ possui $(a - 1)$ graus de liberdade, pois existem a níveis do fator analisado, e a soma SQ_E possui $a(m - 1)$ graus de liberdade, uma vez que as réplicas fornecem os $m - 1$ grau de liberdade necessários para o erro.

De posse dessas informações, são obtidas a média quadrática dos tratamentos ($MQ_{Tratamentos}$) e a média quadrática dos erros (MQ_E), que consistem basicamente nas somas quadráticas divididas pelos respectivos graus de liberdade. As Equações 2.18 e 2.19 apresentam as formas de cálculo de ambas as médias quadráticas mencionadas.

$$MQ_{Tratamentos} = \frac{SQ_{Tratamentos}}{(a - 1)} \quad (2.18)$$

$$MQ_E = \frac{SQ_E}{a(m-1)} \quad (2.19)$$

Após o cálculo de todas as variáveis apresentadas, é possível montar a tabela de ANOVA. Um dos objetivos principais de sua elaboração é a obtenção da razão F_0 , que segue a distribuição F de Fisher com $(a-1)$ e $a(m-1)$ graus de liberdade (Eq. 2.20).

$$MQ_E = \frac{SQ_E}{a(m-1)} \quad (2.20)$$

As análises de variância são efetuadas com base em um nível de confiança α estipulado. Quando o p -valor correspondente ao F_0 obtido é inferior ao valor de α , a hipótese H_0 é rejeitada, indicando que um dos tratamentos considerados exerce influência sobre a média geral. Por fim, é exibida a Tab. 2.4 que sintetiza a análise de variância com um único fator, considerando os efeitos fixos.

Tab. 2.4 – Análise de variância com um único fator e efeitos fixos.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0
Tratamentos	$SQ_{Tratamentos}$	$a-1$	$MQ_{Tratamentos}$	$\frac{MQ_{Tratamentos}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$a(m-1)$	MQ_E	
Total	SQ_T	$am-1$		

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo, as etapas necessárias para a realização do presente trabalho são especificadas e detalhadas, quais sejam: planejamento dos experimentos, medições dos parâmetros de rugosidade, estimativa da incerteza de medição e análise estatística dos dados coletados.

3.1 Planejamento dos Experimentos

Com o intuito de avaliar o efeito do raio da ponta do apalpador na medição da rugosidade de blocos de compressores herméticos, foi definido um planejamento experimental completamente aleatorizado com um único fator, em que o fator raio da ponta do apalpador foi avaliado em dois níveis, quais sejam: 2 μm e 5 μm .

Foram avaliados três tipos de superfícies dos blocos dos compressores herméticos constituídos de ferro fundido cinzento do fabricante Embraco, sendo que cada um deles foi submetido a um processo de usinagem diferente, a saber: fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional. Cada tipo de superfície teve sua rugosidade avaliada por meio de ambos os apalpadores e, em cada condição do ensaio, foram efetuadas 5 medições. No total, considerando 3 tipos de superfícies dos blocos de compressor, 2 raios de ponta e 10 blocos de compressores, foram realizadas 300 medições.

Ainda considerando o planejamento experimental, ao definir que as medições realizadas com a ponta de raio de 2 μm para uma determinada superfície usinada consiste na amostra A e

que as medições efetuadas com a ponta de raio de 5 μm são a amostra B, as seguintes suposições devem ser apresentadas:

- A amostra A é uma amostra aleatória de tamanho n_A retirada da população A, com média populacional η_A e desvio padrão populacional σ_A ;
- A amostra B é uma amostra aleatória de tamanho n_B retirada da população B, com média populacional η_B e desvio padrão populacional σ_B ;
- Ambas as populações apresentam distribuição normal, conforme evidenciado por Barros et al. (2019);
- Os desvios-padrão das populações A e B são iguais, isto é, $\sigma_A = \sigma_B$;
- A_1, A_2, \dots, A_{10} é uma amostra aleatória com distribuição normal $N(\eta_A, \sigma_A)$;
- B_1, B_2, \dots, B_{10} é uma amostra aleatória com distribuição normal $N(\eta_B, \sigma_B)$;
- A_1, A_2, \dots, A_{10} e B_1, B_2, \dots, B_{10} são duas amostras independentes.

Os parâmetros de rugosidade R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ foram coletados para as superfícies submetidas aos processos de fresamento frontal e mandrilamento. Já os parâmetros R_k , Rpk e Rvk foram coletados para as superfícies brunidas. Após a realização dos experimentos, foram calculadas as incertezas relacionadas às medições. Também foi efetuado o tratamento estatístico dos dados por meio da técnica da análise de variância (ANOVA) para que os resultados fossem divulgados com um nível de confiança adequado.

A Figura 3.1 mostra a vista frontal do bloco do compressor, com destaque para as superfícies usinadas que foram avaliadas neste trabalho e a Fig 3.2 apresenta a vista explodida do compressor hermético.

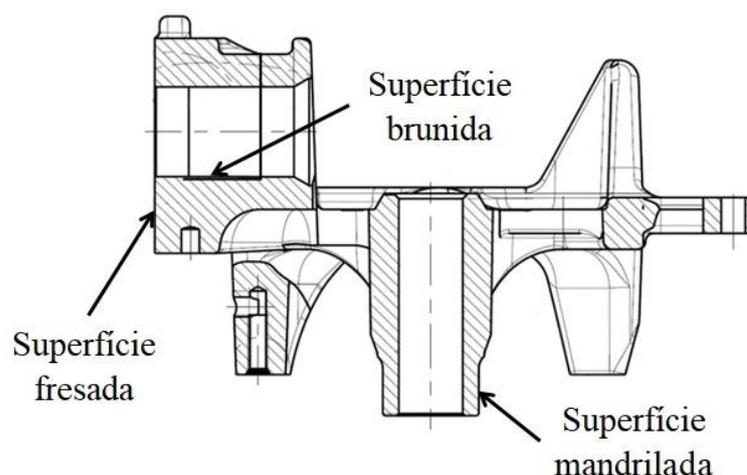


Figura 3.1 – Vista frontal do bloco de compressor hermético do fabricante Embraco.



Figura 3.2 – Vista explodida do compressor hermético (SOUZA et al., 2019).

As superfícies fresadas dos blocos foram submetidas a um processo de usinagem que possibilitou a obtenção de valores apropriados de desvio de planeza e rugosidade, pois essas superfícies se acoplam à junta grupada e à placa válvula. Por sua vez, as superfícies mandriladas dos blocos devem apresentar qualidade suficiente (rugosidade, diâmetro, desvio de circularidade e desvio de cilindridade) para proporcionar o acoplamento perfeito do bloco com o rotor, permitindo a sua rotação. Ambos os tipos de superfícies foram usinados por meio de uma máquina transfer rotativa modelo GB do fabricante Grob. Os parâmetros de corte dessas operações foram mantidos em sigilo pelo fabricante dos compressores

Já as superfícies brunidas, que consistem nos cilindros dos blocos de compressor, foram usinadas por uma máquina brunidora vertical multifuso do fabricante Gehring. Um

conjunto de três brunidores foi utilizado, sendo o primeiro deles (granulometria de 120 *mesh*) para desbaste, o segundo (granulometria de 270 *mesh*) para semi-acabamento e o terceiro (granulometria de 600 *mesh*) para acabamento.

Os parâmetros de brunimento foram definidos como 550 rpm para as ferramentas de desbaste e semi-acabamento e 500 rpm para a ferramenta de acabamento. A profundidade de corte foi de 0,014 mm e a velocidade de avanço de 300 mm/min (PEREIRA, 2017). Os cilindros dos blocos do compressor devem possuir valores adequados de rugosidade, desvio de circularidade e desvio de cilindridade para evitar ao máximo o contato metal-metal que ocorre devido à interação do cilindro com o pistão. No entanto, eles devem também possuir perfis de rugosidade com reservatórios que possibilitem o acúmulo de lubrificante, de modo a permitir a formação de uma fina camada de óleo entre o cilindro e o pistão.

A Figura 3.3 contém uma foto de um dos blocos de compressor utilizados nos ensaios. Em ambas as figuras estão destacadas as superfícies usinadas cujos parâmetros de rugosidade foram medidos com os apalpadores com pontas de raios 2 μm e 5 μm .

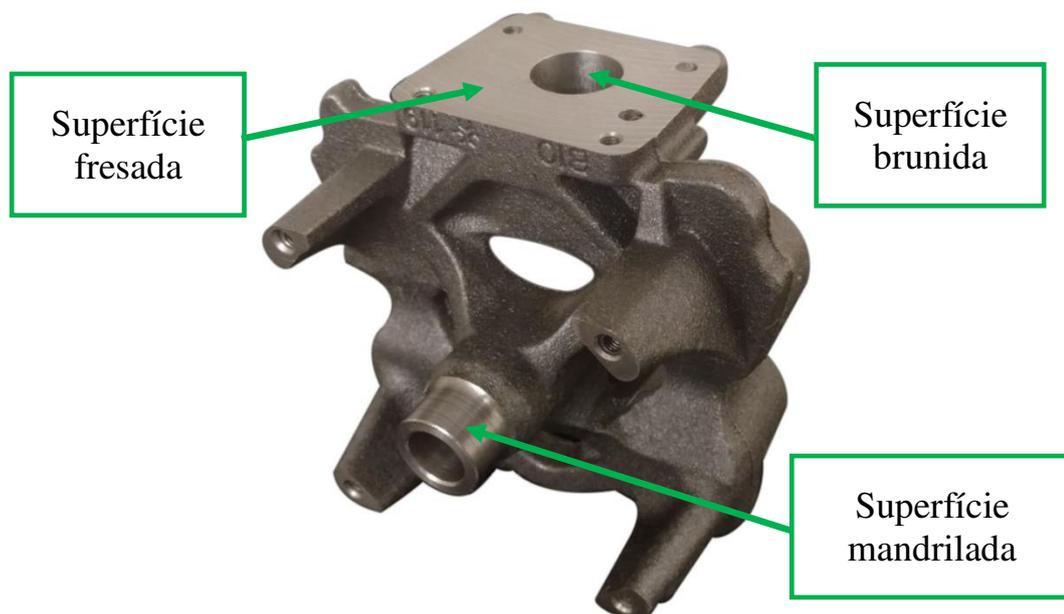


Figura 3.3 – Bloco de compressor hermético do fabricante Embraco.

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 contém a sequência das condições de teste propostas, sendo que para cada condição foram realizadas 5 medições. Durante essas medições, os apalpadores de pontas distintas foram alternados e os blocos dos compressores foram ordenados aleatoriamente. A aleatoriedade é extremamente importante nesse experimento porque ela faz

com que o efeito de qualquer variável de ruído que possa exercer alguma influência no resultado final seja aproximadamente balanceado (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Tabela 3.1 – Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies fresadas dos blocos de compressores herméticos.

	Raio da Ponta r (Rugosímetro)	
	$r = 2 \mu\text{m}$	$r = 5 \mu\text{m}$
Bloco do compressor 10	Condição 1	Condição 2
Bloco do compressor 2	Condição 4	Condição 3
Bloco do compressor 9	Condição 5	Condição 6
Bloco do compressor 3	Condição 8	Condição 7
Bloco do compressor 1	Condição 9	Condição 10
Bloco do compressor 8	Condição 12	Condição 11
Bloco do compressor 5	Condição 13	Condição 14
Bloco do compressor 7	Medição 16	Condição 15
Bloco do compressor 4	Condição 17	Condição 18
Bloco do compressor 6	Condição 20	Condição 19

Tabela 3.2 – Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies mandriladas dos blocos de compressores herméticos.

	Raio da Ponta r (Rugosímetro)	
	$r = 2 \mu\text{m}$	$r = 5 \mu\text{m}$
Bloco do compressor 8	Condição 22	Condição 21
Bloco do compressor 6	Condição 23	Condição 24
Bloco do compressor 4	Condição 26	Condição 25
Bloco do compressor 9	Condição 27	Condição 28
Bloco do compressor 10	Condição 30	Condição 29
Bloco do compressor 3	Condição 31	Condição 32
Bloco do compressor 7	Condição 34	Condição 33
Bloco do compressor 1	Condição 35	Condição 36
Bloco do compressor 2	Condição 38	Condição 37
Bloco do compressor 5	Condição 39	Condição 40

Tabela 3.3 – Condições estipuladas para o levantamento dos parâmetros de rugosidade das superfícies brunidas dos blocos de compressores herméticos.

	Raio da Ponta r (Rugosímetro)	
	$r = 2 \mu\text{m}$	$r = 5 \mu\text{m}$
Bloco do compressor 3	Condição 41	Condição 42
Bloco do compressor 7	Condição 44	Condição 43
Bloco do compressor 1	Condição 45	Condição 46
Bloco do compressor 9	Condição 48	Condição 47
Bloco do compressor 6	Condição 49	Condição 50
Bloco do compressor 10	Condição 52	Condição 51
Bloco do compressor 2	Condição 53	Condição 54
Bloco do compressor 8	Condição 56	Condição 55
Bloco do compressor 5	Condição 57	Condição 58
Bloco do compressor 4	Condição 60	Condição 59

3.2 Medições dos Parâmetros de Rugosidade

As medições dos parâmetros de rugosidade foram efetuadas com um rugosímetro eletromecânico portátil digital, modelo 112/1590 do fabricante Taylor Hobson (Fig. 3.4). Este equipamento possui resolução igual a $0,001 \mu\text{m}$ ou $0,01 \mu\text{m}$ e dois apalpadores com ponta de diamante: uma de raio $2 \mu\text{m}$ e a outra de raio $5 \mu\text{m}$. Ambos os apalpadores possuem ângulo de cone igual a 60° .

Os apalpadores também possuem um filtro mecânico conhecido como sapata ou *skid*. Tanto para a ponta de $2 \mu\text{m}$ quanto para a ponta de $5 \mu\text{m}$, a largura da sapata é igual a 3mm , o diâmetro é igual a 6mm e a sua distância até a ponta de diamante é igual a 3mm . A Figura 3.5 mostra ambos os apalpadores utilizados.

O rugosímetro eletromecânico foi calibrado no Laboratório de Ensino em Metrologia (LEMETRO) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O certificado de calibração de número CCA-0001/2018 é apresentado no Anexo I.



Figura 3.4 – Rugosímetro eletromecânico portátil modelo 112/1590 do fabricante Taylor Hobson.

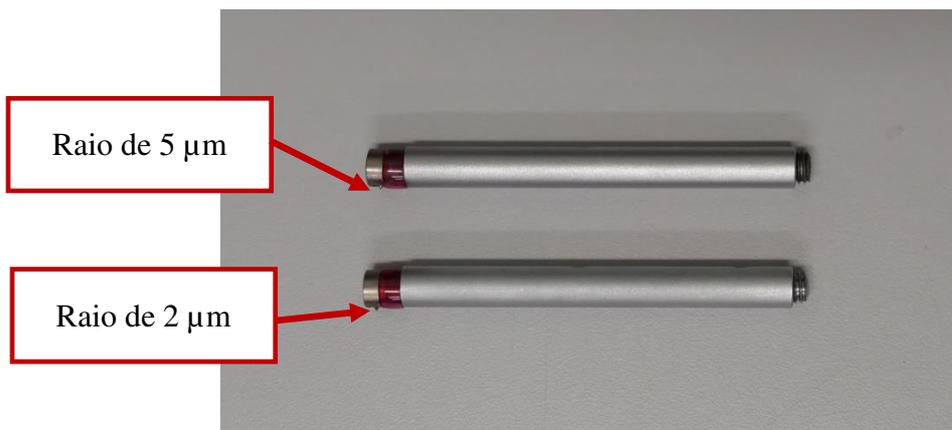


Figura 3.5 – Apalpadores com pontas de raios de 2 μm e 5 μm utilizados nas medições de rugosidade.

Para cada condição estipulada, foram realizadas 5 medições, sendo que a média de 5 valores coletados indicaram os valores dos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$, para as superfícies fresadas e mandriladas, e dos parâmetros R_k , Rpk e Rvk (família Rk) para as superfícies brunidas. As medições da rugosidade dessas superfícies usinadas foram realizadas no LEMETRO sobre uma mesa de desempenho de granito, com o intuito de minimizar os efeitos das vibrações mecânicas transmitidas pelo solo.

As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 mostram o posicionamento dos blocos de compressor e dos equipamentos e dispositivos utilizados nas medições das superfícies fresadas, mandriladas e brunidas dos blocos de compressor, respectivamente.



Figura 3.6 – Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies fresadas.

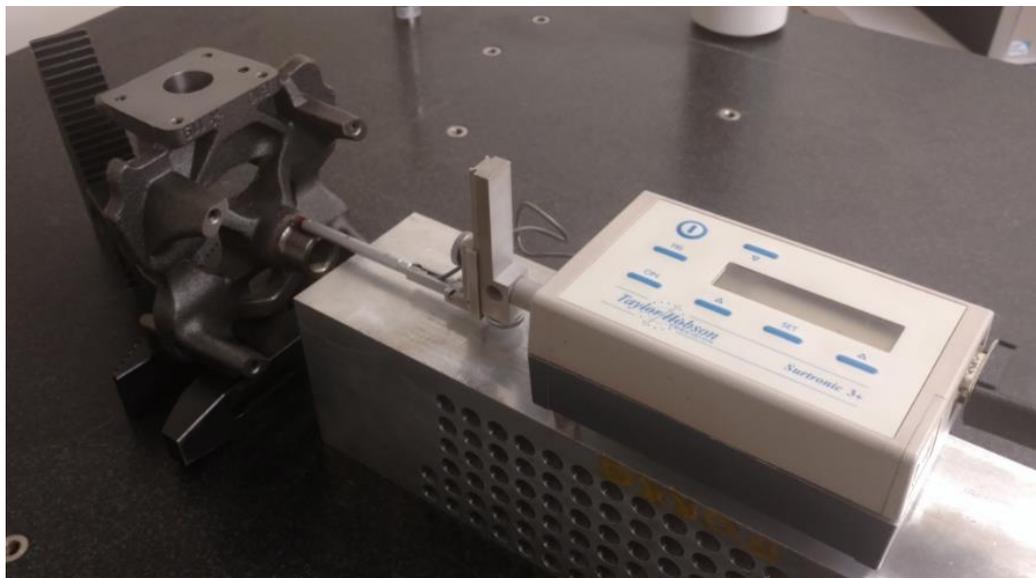


Figura 3.7 – Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies mandriladas.

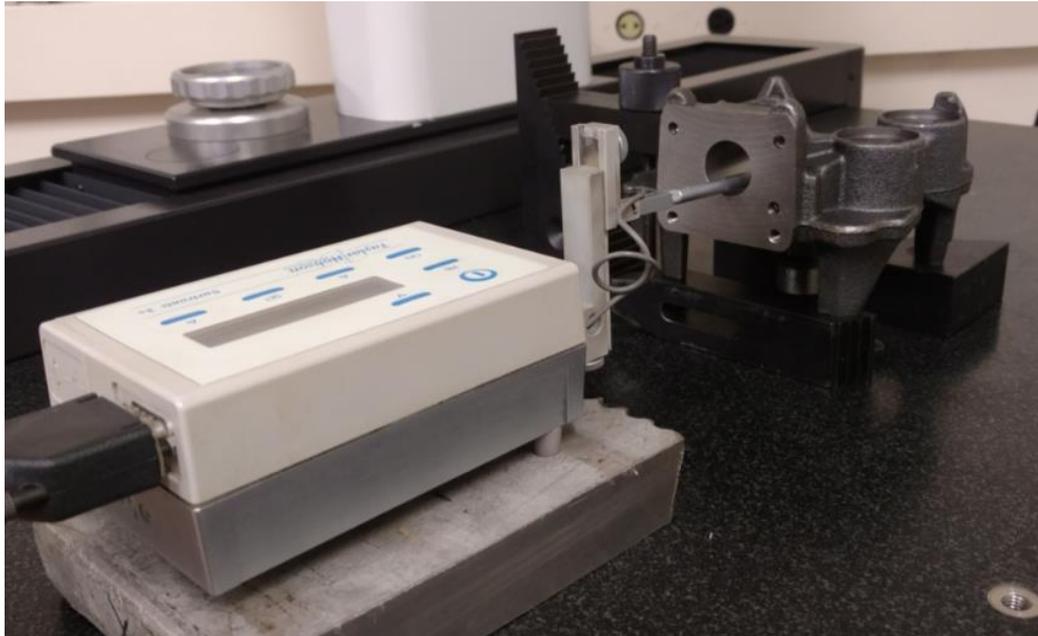


Figura 3.8 – Posicionamento do bloco de compressor, do rugosímetro e dos demais dispositivos para a medição das superfícies brunidas.

Os valores de comprimento de amostragem (*cut-off*) foram determinados com base na NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) em função dos valores do parâmetro Ra de cada tipo de superfície. Para as superfícies fresadas e mandriladas foi adotado o *cut-off* de 2,5 mm. Já para a superfície brunida, o *cut-off* adotado foi de 0,8 mm.

Nas medições das superfícies fresadas e brunidas, foram adotados 5 comprimentos de amostragem para compor o comprimento de avaliação, enquanto apenas 3 comprimentos de amostragem foram adotados para as superfícies mandriladas. Essa diferença ocorreu devido ao comprimento total da região mandrilada a ser avaliada, que não possibilitava a adoção de mais comprimentos de amostragem. Com o intuito de remover as ondulações das superfícies medidas, foi utilizado o filtro gaussiano para os parâmetros Rp , Rv , Rz , Rt , Ra , Rq e $R\Delta q$ e o filtro duplo gaussiano para os parâmetros Rk , Rpk e Rvk . A direção de apalpação foi perpendicular às marcas de usinagem em todos os casos.

A temperatura do laboratório foi mantida a $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e monitorada por meio de um termo-higrômetro digital do fabricante Instrutherm com resolução de $0,1 ^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20 \text{ a } 60) ^\circ\text{C}$. Este equipamento possui o certificado de calibração N. R4996/13 emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação (ANEXO II), que indica uma incerteza expandida de $0,3 ^\circ\text{C}$ para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade. Os blocos de compressores e os equipamentos e dispositivos utilizados nas medições foram

deixados por 12 horas à temperatura padrão de medição para atingir o equilíbrio térmico. O rugosímetro foi ligado 2 horas antes de se efetuar qualquer medição.

Os dados das medições foram coletados por meio do *software Talyprofile Gold 4.0* fornecido pelo fabricante do rugosímetro. Além de informar os valores dos parâmetros de interesse, o programa computacional gerou os perfis de rugosidade e as curvas de *Abbott-Firestone*, que são importantes para complementar a análise das superfícies brunidas.

3.3 Estimativa da Incerteza de Medição

As incertezas relacionadas às medições dos parâmetros de rugosidade R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q , $R\Delta q$, R_k , Rpk e Rvk foram estimadas. O método padrão utilizado para o cálculo das incertezas foi aquele apresentado pelo Guia para Expressão de Incerteza de Medição (INMETRO, 2012).

As variáveis de influência consideradas para o cálculo da incerteza das medições efetuados por meio do rugosímetro eletromecânico foram: variabilidade das leituras efetuadas por meio do sistema de medição, resolução do rugosímetro, incerteza associada à calibração do rugosímetro, raio da ponta do apalpador (ARANTES et al., 2017; PEREIRA et al., 2017; LEACH, 2014; SONG, 2014; YOSHIDA, TSUKADA; 2006; BHUSHAN, 2002) e deformação do material do bloco de compressor durante a medição (DOBES, 2017; LEACH, 2014; BHUSHAN, 2000; POON, BHUSHAN, 1995).

Como as medições de rugosidade foram efetuadas em laboratório com temperatura monitorada de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, a variável variação de temperatura não foi considerada para a estimativa das incertezas de medição. A vibração mecânica transmitida pelo solo também não foi considerada, uma vez que as medições foram efetuadas sobre uma mesa de desempenho de granito.

Assim sendo, o modelo matemático utilizado para o cálculo da incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade citados é expresso por meio da Eq. 3.1.

$$P_R = \bar{x}(L_R) + \Delta R_R + \Delta C_R + \Delta P_R + \Delta D \quad (3.1)$$

Em que:

- P_R : parâmetro de rugosidade medido (mensurando);

- $\bar{x}(L_R)$: média aritmética dos valores indicados pelo sistema de medição;
- ΔR_R : correção associada à resolução do rugosímetro;
- ΔC_R : correção associada à incerteza de calibração do rugosímetro;
- ΔR_p : correção associada ao raio de ponta do apalpador;
- ΔD : correção associada à deformação do material do bloco de compressor durante a medição.

Após a definição do modelo matemático foi possível calcular as incertezas-padrão, que consistem nas incertezas individuais relativas a cada variável de influência considerada. Essas incertezas apresentam um nível de abrangência de 67,28 %. A Tabela 3.4 apresenta as formas de cálculo de incerteza-padrão relativas a cada variável, bem como o tipo da avaliação da incerteza, distribuição de probabilidade, graus de liberdade e coeficiente de sensibilidade.

Tabela 3.4 – Dados relativos ao cálculo das incertezas-padrão para as medições dos parâmetros de rugosidade avaliados.

Variável	Tipo de Avaliação	Distribuição de Probabilidade	Incerteza-padrão	Graus de Liberdade	Coefficiente de Sensibilidade
$\bar{x}(L_R)$	A	<i>t de Student</i>	$u(\bar{x}(L_R)) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	4	1
ΔR_R	B	Retangular	$u(\Delta R_R) = \frac{R_R}{2 \cdot \sqrt{3}}$	∞	1
ΔC_R	B	<i>t de Student</i>	$u(\Delta C_R) = \frac{U(C_R)}{k_R}$	∞	1
ΔR_p	B	Retangular	$u(\Delta R_p) = \frac{0,02 \cdot R_p}{\sqrt{3}}$	∞	1
ΔD	B	Retangular	$u(\Delta D) = \frac{D}{\sqrt{3}}$	∞	1

Na Tabela 3.4, tem-se que:

- s : desvio padrão dos valores indicados pelo sistema de medição;
- n : número de leituras efetuadas;
- R_R : resolução do rugosímetro;
- $U(C_R)$: incerteza expandida relacionada à calibração do rugosímetro;

- k_R : fator de abrangência utilizado no cálculo da incerteza expandida relacionada à calibração do rugosímetro;
- R_p : raio da ponta do apalpador;
- D : deformação do material dos blocos de compressores herméticos.

Haitjema (1998) afirmou que a contribuição da variável raio da ponta do apalpador na incerteza de medição é equivalente a 2 % do valor do raio da ponta. Por esse motivo, o raio da ponta é multiplicado por 0,02 na equação da incerteza-padrão associada a essa variável. Também, é importante considerar que Leach (2014) considera 20 nm como um valor conservativo a ser adotado para a deformação provocada pela ponta do apalpador em qualquer material.

Após o cálculo das incertezas-padrão relacionadas a todas as variáveis de influência consideradas no modelo matemático, foi calculada a incerteza-padrão combinada com um nível de abrangência de 67,28 %. Para isso, foi aplicada a “lei de propagação de incertezas”, conforme mostra a Eq. 3.2.

$$u_c^2(P_R) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_R)) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta C_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_p) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta D) \quad (3.2)$$

Ao obter o valor da incerteza-padrão combinada, foi possível estimar a incerteza expandida com um nível de abrangência de 95 %, pois 68,27 % de abrangência não é suficiente para as aplicações relacionadas à engenharia mecânica. O fator de abrangência k foi obtido por meio da equação de *Welch-Satterthwaite* e em seguida multiplicado pelo valor da incerteza-padrão combinada.

3.4 Análise Estatística dos Dados Coletados

Os resultados das medições de rugosidade obtidos por meio das pontas de raio 2 μm e 5 μm foram analisados por meio da técnica estatística da Análise de Variância (ANOVA) e do teste t combinado. Esta análise permitiu identificar se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as medições efetuadas com as pontas de raios de 2 μm e 5 μm .

Como esperado, os p -valores obtidos por meio de ambas as técnicas estatísticas mencionadas foram idênticos. Por este motivo, os resultados apresentados nas páginas seguintes deste trabalho foram apenas baseados na ANOVA.

Foram conduzidas análises estatísticas para todos os parâmetros avaliados em cada tipo de superfície usinada, o que resultou em um total de 17 tabelas de ANOVA. O *software* STATISTICA foi utilizado para esse propósito. Foram obtidos os valores de probabilidade p -valor para cada análise efetuada, sendo que os p -valores inferiores ao valor de α estipulado (0,05) indicaram os casos em que existiu diferença significativa entre as medições com as diferentes pontas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio dos experimentos realizados, bem como o tratamento dos dados.

4.1 Efeito do Raio da Ponta do Apalpador na Medição das Superfícies Fresadas

A Tabela 4.1 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade medidos nas superfícies fresadas, bem como os respectivos valores de incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95 %. Pela análise desta tabela, percebe-se que todos os parâmetros de rugosidade apresentaram valores ligeiramente maiores quando medidos com o apalpador com raio de ponta de 2 μm , sendo que o parâmetro R_v apresentou a maior diferença percentual (10,6 %) e o R_p a menor (4,8 %).

De acordo com Leach (2014), é provável que os valores dos parâmetros de rugosidade classificados como de amplitude e híbridos sejam maiores quando medidos com pontas de raios menores. Isso se deve ao fato das pontas de raios menores acessarem mais facilmente as regiões estreitas dos vales do perfil. O fato de o parâmetro R_v ter apresentado a maior diferença percentual entre as médias coletadas mostrou que, de fato, nas medições realizadas, este foi o parâmetro mais afetado pela utilização de pontas de raios distintos.

Os vales mais profundos e/ou mais estreitos são menos acessados por meio da ponta com raio de 5 μm . Desta forma, a linha média do perfil se deslocou levemente para cima, para que as áreas dos picos e dos vales permanecessem iguais. Isso provocou a redução no valor médio do parâmetro R_p com o aumento do raio da ponta do apalpador.

Os parâmetros R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ também foram influenciados pelo efeito do raio da ponta, uma vez que todos eles tiveram seus valores reduzidos quando medidos por meio da ponta de raio 5 μm . No que diz respeito à incerteza expandida, os valores de U_P (95 %) relativos aos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t e $R\Delta q$ foram maiores nas medições realizadas com a ponta de raio de 2 μm . A incerteza expandida relacionada ao parâmetro R_a foi levemente maior no caso das medições efetuadas com a ponta de raio de 5 μm . Por fim, ambas as incertezas U_P (95 %) calculadas para o parâmetro R_q assumiram o valor de 0,34 μm .

Tabela 4.1 – Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies fresadas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %).

Parâmetro	Raio de ponta de 2 μm		Raio de ponta de 5 μm		Diferença percentual das médias
	Média	U_P (95 %)	Média	U_P (95 %)	
R_p [μm]	9,61	0,68	9,15	0,55	4,80 %
R_v [μm]	17,21	1,19	15,39	1,06	10,56 %
R_z [μm]	26,83	1,63	24,56	1,34	8,46 %
R_t [μm]	34,34	2,15	31,70	1,92	7,70 %
R_a [μm]	3,97	0,29	3,72	0,30	6,24 %
R_q [μm]	4,96	0,34	4,65	0,34	6,17 %
$R\Delta q$ [°]	13,86	0,64	12,69	0,51	8,43 %

Para facilitar a visualização dos resultados, são apresentadas as Figs. 4.1 e 4.2. A Figura 4.1 contém o gráfico dos valores médios dos parâmetros de amplitude e as respectivas incertezas expandidas (95 %) representadas por meio das barras de erros. A Figura 4.2 trata especificamente do parâmetro híbrido $R\Delta q$, uma vez que ele representa uma inclinação e é expresso em graus.

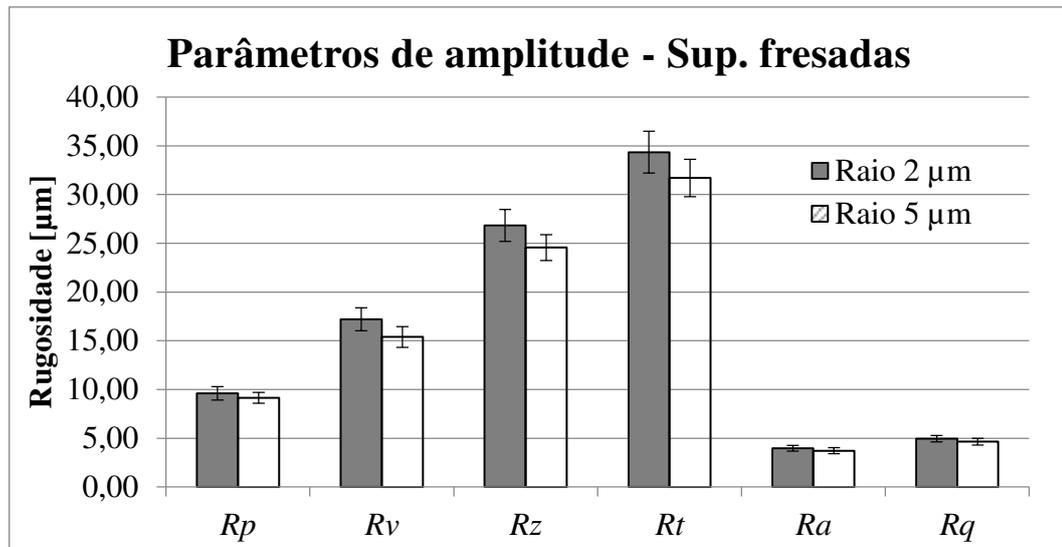


Figura 4.1 – Valores médios dos parâmetros de amplitude referentes às superfícies fresadas com as respectivas incertezas expandidas (nível de confiança de 95 %).

Como esperado, os valores do parâmetro R_t apresentaram os maiores valores dentre todos os parâmetros analisados. Quando medido com a ponta de 2 μm , o R_t atingiu o valor de 34,34 μm com uma incerteza expandida de 2,15 μm , enquanto seu valor foi de 31,70 μm quando medido com a ponta de 5 μm , com incerteza expandida de 1,92 μm para um nível de confiança de 95 %. A rugosidade média expressa pelo parâmetro R_a foi de 3,97 μm na medição com a ponta de 2 μm e 3,72 μm na medição com a ponta de 5 μm . As incertezas expandidas obtidas foram de 0,29 μm e 0,30 μm respectivamente.

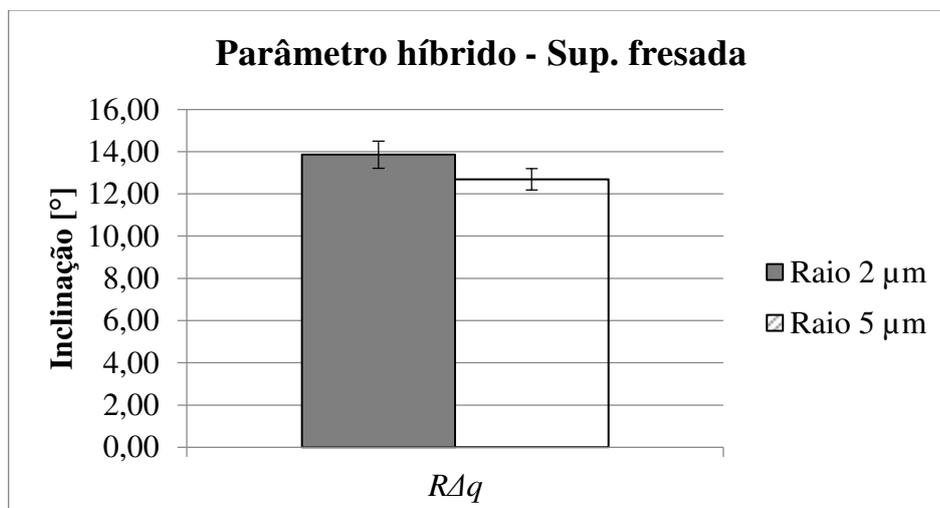


Figura 4.2 – Valores médios do parâmetro híbrido $R\Delta q$ referentes às superfícies fresadas com as respectivas incertezas expandidas (nível de confiança de 95 %).

As diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meio das pontas de raios de 2 μm e 5 μm e os valores de incerteza expandida relativos às medições efetuadas com a ponta de raio 2 μm são exibidas na Fig. 4.3. Nesta figura, é possível observar que, para os parâmetros R_p , R_a e R_q , as diferenças entre os valores médios obtidos com pontas distintas são menores que as respectivas incertezas expandidas. É válido destacar que as incertezas apresentadas foram estimadas considerando amostras de 50 leituras com o intuito de minimizar o efeito de outras fontes de erros.

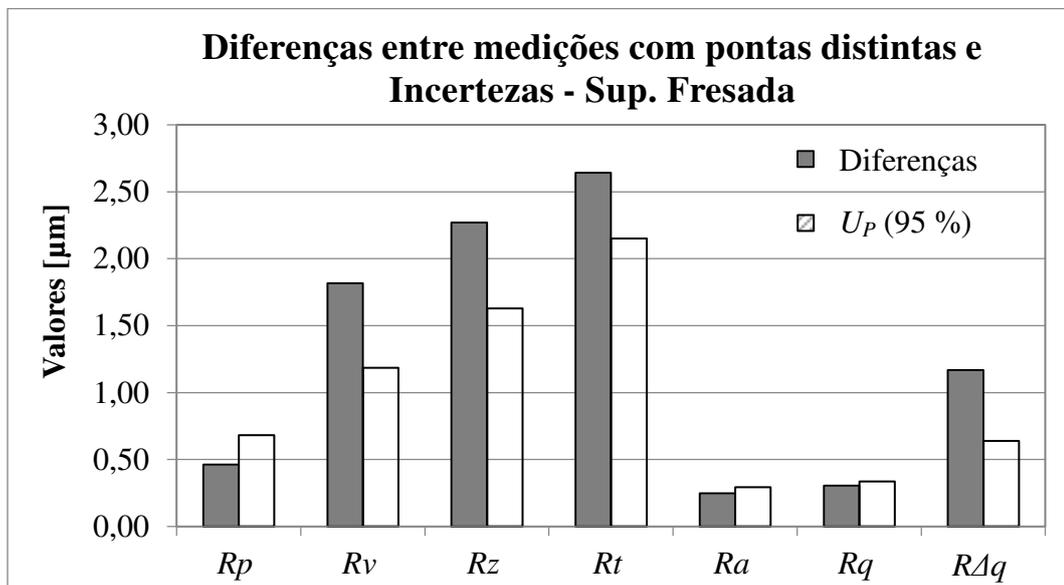


Figura 4.3 – Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies fresadas.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os perfis de rugosidade das superfícies fresadas dos blocos dos compressores 3 e 8, respectivamente, coletados a partir das primeiras medições com o apalpador com raio de ponta de 2 μm (Fig. 4.4(a) e Fig. 4.5(a)) e com raio de ponta de 5 μm (Fig. 4.4(b) e Fig. 4.5(b)).

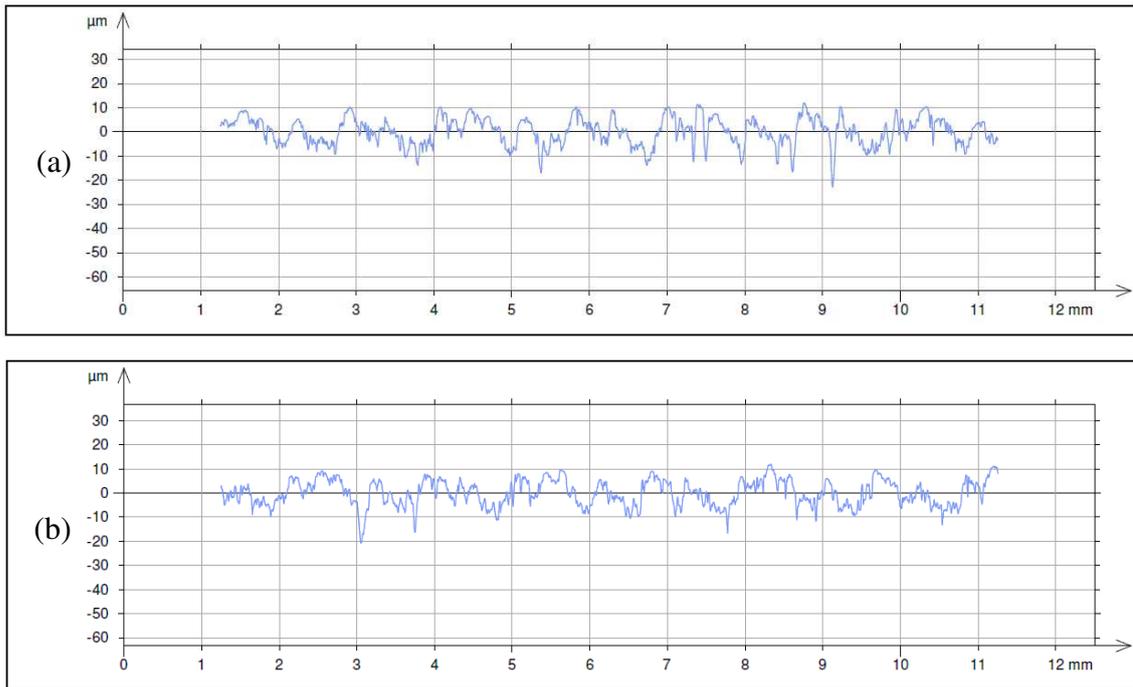


Figura 4.4 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície fresada do bloco de compressor 3 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

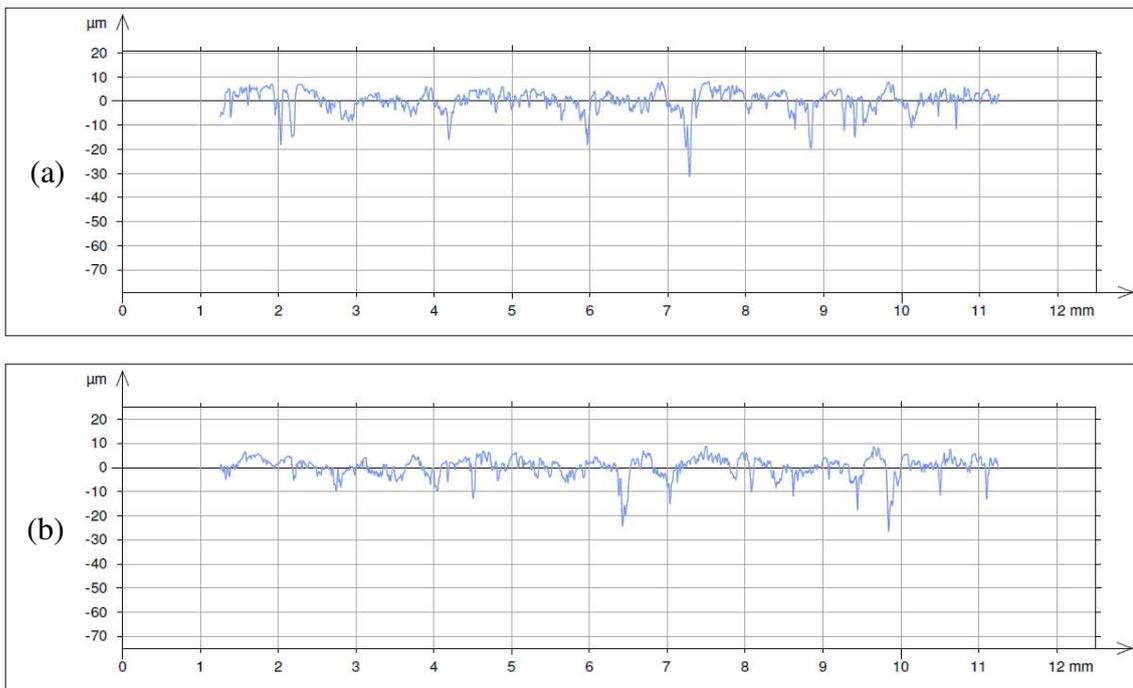


Figura 4.5 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície fresada do bloco de compressor 8 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

Nas Figuras 4.4 e 4.5, observa-se que os perfis obtidos com os apalpadores de raios de 2 μm e 5 μm são similares. As diferenças observadas podem ser atribuídas principalmente ao fato desses perfis terem sido obtidos em locais próximos, porém diferentes, na superfície. É válido ressaltar que a medição de rugosidade com contato é um teste destrutivo, não sendo possível medir duas vezes no mesmo local.

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos por meio ANOVA para cada parâmetro de rugosidade analisado nas superfícies fresadas. O único fator considerado foi o raio da ponta (*RP*).

Tabela 4.2 – Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros *Rp*, *Rv*, *Rz*, *Rt*, *Ra*, *Rq* e *RΔq* das superfícies fresadas.

Parâmetro	Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0	<i>p</i> -valor
<i>Rp</i>	<i>RP</i>	1,064	1	1,064	0,3516	0,560588
	Erro	54,447	18	3,025		
	Total	55,511				
<i>Rv</i>	<i>RP</i>	16,504	1	16,504	4,000	0,060823
	Erro	74,268	18	4,126		
	Total	90,772				
<i>Rz</i>	<i>RP</i>	25,76	1	25,76	2,474	0,133145
	Erro	187,44	18	10,41		
	Total	213,2				
<i>Rt</i>	<i>RP</i>	34,95	1	34,95	2,236	0,152119
	Erro	281,33	18	15,63		
	Total	316,28				
<i>Ra</i>	<i>RP</i>	0,3065	1	0,3065	0,6052	0,446694
	Erro	9,1164	18	0,5065		
	Total	9,4229				
<i>Rq</i>	<i>RP</i>	0,4676	1	0,4676	0,7934	0,384820
	Erro	10,6076	18	0,5893		
	Total	11,0752				
<i>RΔq</i>	<i>RP</i>	6,821	1	6,821	17,183	0,000608
	Erro	7,146	18	0,397		
	Total	13,967				

Os *p*-valores relativos ao fator *RP* se mostraram superiores a 0,05 para os parâmetros de rugosidade medidos nas superfícies fresadas dos blocos de compressores herméticos analisados, com exceção do parâmetro *RΔq*, cujo *p*-valor obtido foi de 0,006. Assim sendo, é possível afirmar, com um nível de confiança de 95 %, que os valores dos parâmetros *Rp*, *Rv*,

R_z , R_t , R_a e R_q não apresentam diferenças estatisticamente significativas quando obtidos por meio de pontas de 2 μm e 5 μm .

É necessário, portanto, destacar o fato de que o uso de pontas de raios de 2 μm e 5 μm resulta em valores de $R\Delta q$ distintos, sendo aconselhável o uso da ponta de raio de 2 μm para a obtenção de valores mais próximos dos reais. Para a medição dos demais parâmetros, é possível usar qualquer uma das pontas analisadas. Atenção especial deve ser dada ao parâmetro R_v , cujo p -valor não é menor que 0,05, mas está muito próximo a esse número.

4.2 Efeito do Raio da Ponta do Apalpador na Medição das Superfícies Mandriladas

A Tabela 4.3 contém os valores médios dos parâmetros de rugosidade medidos nas superfícies mandriladas e os valores de incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies mandriladas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %).

Parâmetro	Raio de ponta de 2 μm		Raio de ponta de 5 μm		Diferença percentual das médias
	Média	U_P (95 %)	Média	U_P (95 %)	
R_p [μm]	12,95	0,70	12,57	0,58	2,92 %
R_v [μm]	18,61	1,03	17,37	0,84	6,65 %
R_z [μm]	31,55	1,56	29,94	1,16	5,10 %
R_t [μm]	37,42	1,98	34,81	1,41	6,98 %
R_a [μm]	5,41	0,30	5,32	0,30	1,64 %
R_q [μm]	6,90	0,36	6,73	0,33	2,49 %
$R\Delta q$ [°]	23,64	1,00	22,75	0,71	3,80 %

Também no caso das superfícies mandriladas, é possível observar que os valores médios dos parâmetros coletados foram sensivelmente maiores quando medidos com a ponta de raio de 2 μm . Com relação à incerteza expandida estimada, verificou-se que os valores de U_P (95 %) foram maiores para as medições efetuadas com a ponta de 2 μm em quase todos os

casos. Somente o parâmetro Ra apresentou valores de incerteza expandida iguais ($0,30 \mu\text{m}$) quando medido com as pontas distintas.

Também o parâmetro Ra apresentou menor diferença percentual entre as médias, equivalente a $1,64 \%$. A maior diferença percentual detectada ($7,0 \%$) está relacionada ao parâmetro Rt , seguido do parâmetro Rv , cuja diferença percentual foi de $6,6 \%$.

No caso das superfícies mandriladas, o valor médio do parâmetro Rt foi de $37,42 \mu\text{m}$ quando medido por meio da ponta de raio $2 \mu\text{m}$ e de $34,81 \mu\text{m}$ quando medido com a ponta de raio $5 \mu\text{m}$. Os valores de incerteza expandida para ambas as medições foram de, respectivamente, $1,98 \mu\text{m}$ e $1,41 \mu\text{m}$ considerando um nível de confiança de 95% . O parâmetro Ra assumiu valores médios de $5,41 \mu\text{m}$ e $5,32 \mu\text{m}$ nas medições com apalpadores com pontas de raios $2 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$, respectivamente. Conforme mencionado, os valores de incerteza expandida obtidos foram iguais a $0,30 \mu\text{m}$ para ambas as pontas.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os valores médios dos parâmetros de rugosidade e da incerteza expandida, sendo a última expressa pelas barras de erros.

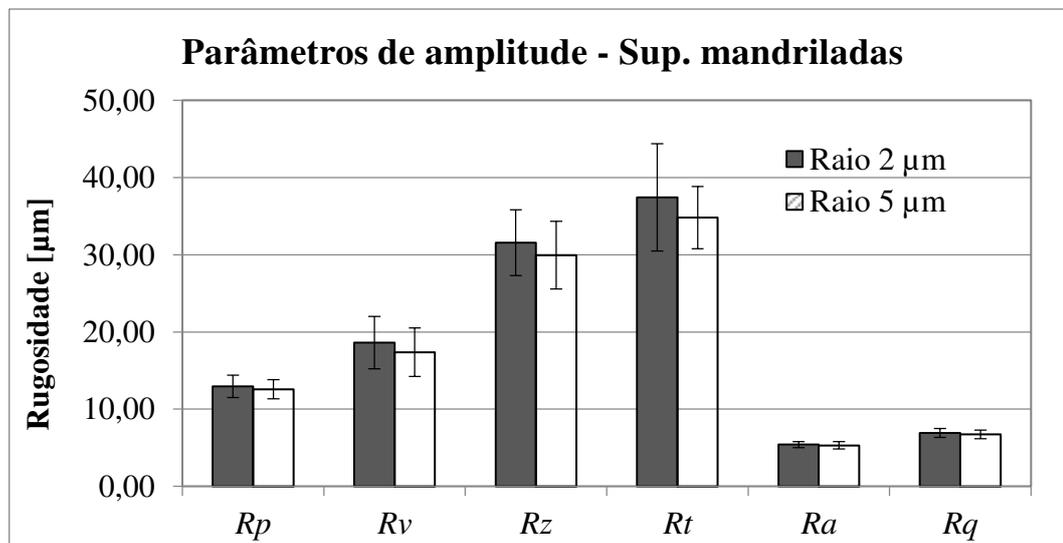


Figura 4.6 – Valores médios dos parâmetros de amplitude referentes às superfícies mandriladas com as respectivas incertezas expandidas (nível de confiança de 95%).

Com relação ao parâmetro híbrido $R\Delta q$ medido nas superfícies mandriladas dos blocos de compressores, foi possível observar que ele assumiu o valor médio de $23,64^\circ$ com incerteza expandida de $1,30^\circ$ para um nível de confiança de 95% nas medições efetuadas por meio da ponta de $2 \mu\text{m}$. Já nas medições realizadas com a ponta de $5 \mu\text{m}$, o valor médio da inclinação foi de $22,75^\circ$, com incerteza expandida de $1,35^\circ$.

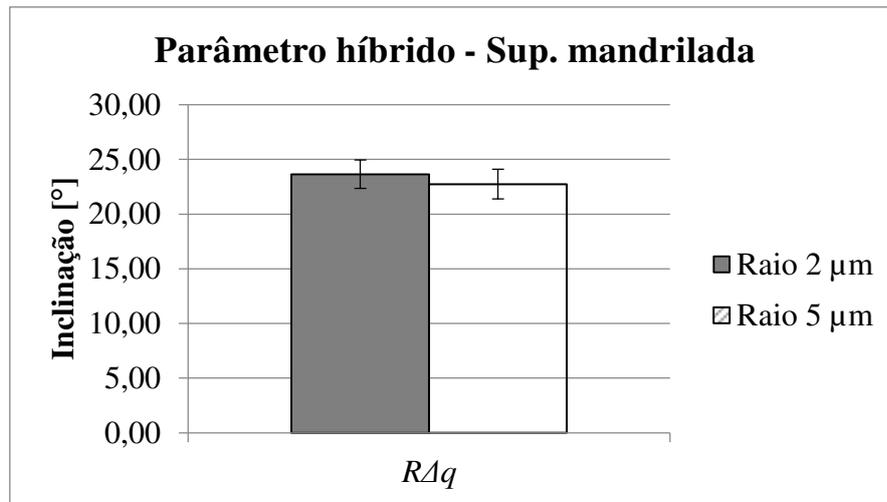


Figura 4.7 – Valores médios do parâmetro híbrido $R\Delta q$ referentes às superfícies mandriladas com as respectivas incertezas expandidas (nível de confiança de 95 %).

A Figura 4.8 apresenta a comparação dos valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meio das pontas de raios de 2 μm e 5 μm com os respectivos valores de incerteza expandida relativos às medições efetuadas com a ponta de raio 2 μm . Os parâmetros R_p , R_a , R_q e $R\Delta q$ apresentaram incertezas expandidas maiores que as diferenças de medições efetuadas com as pontas de raios diferentes. Ainda, é possível perceber que a diferença exibida na Fig. 4.8 para o parâmetro R_z é inferior a 10 %.

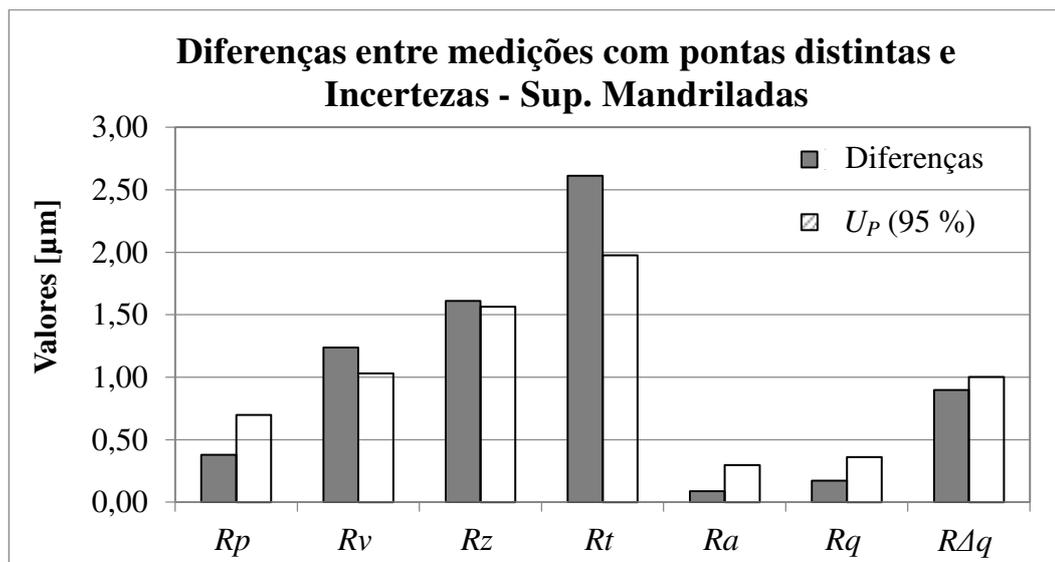


Figura 4.8 – Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies mandriladas.

Os perfis de rugosidade das superfícies mandriladas dos blocos de compressores 2 e 4 são exibidos nas Figs. 4.9 e 4.10, respectivamente. As Figuras 4.9(a) e 4.10(a) representam os perfis coletados a partir das primeiras medições com o apalpador de raio de $2\ \mu\text{m}$, enquanto as Figs. 4.9(b) e 4.10(b) contém os perfis coletados a partir das primeiras medições efetuadas com a ponta de $5\ \mu\text{m}$.

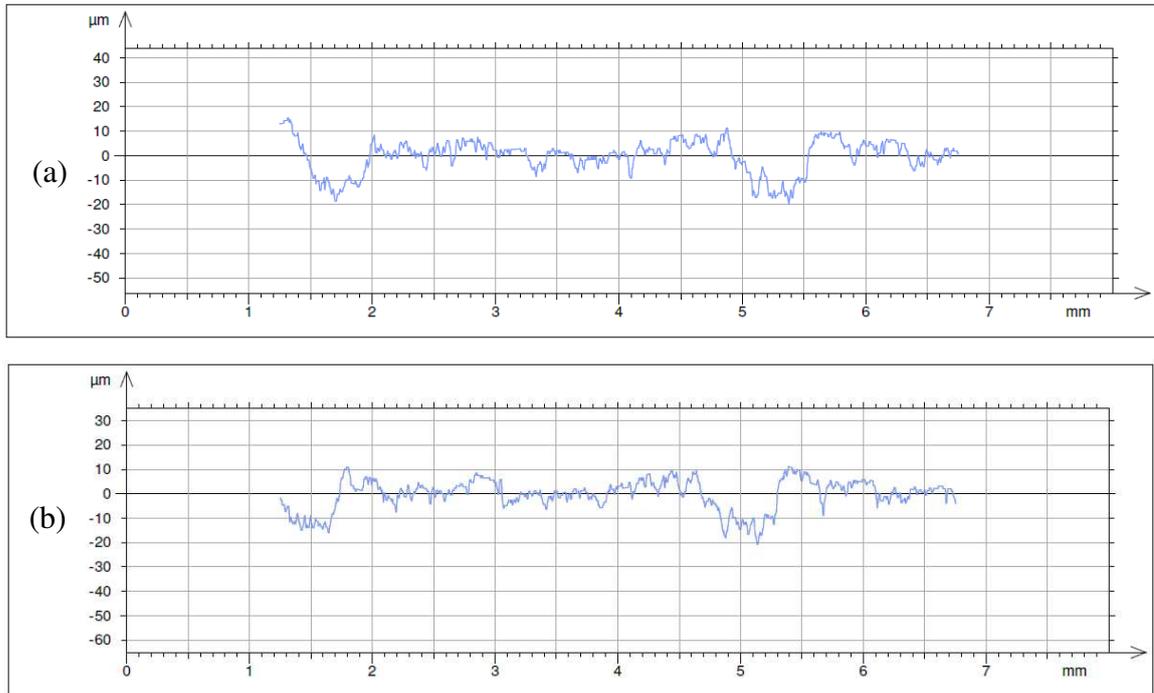


Figura 4.9 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície mandrilada do bloco de compressor 2 com os apalpadores com ponta de raio de $2\ \mu\text{m}$ (a) e com ponta de raio de $5\ \mu\text{m}$ (b).

Analisando os perfis de rugosidade das superfícies mandriladas dos blocos dos compressores, percebe-se que eles são semelhantes e que todos eles possuem regiões mais profundas que foram detectadas em pontos diferentes dos comprimentos de avaliação.

Assim como para as superfícies fresadas, foi necessário aplicar a técnica de ANOVA para verificar se as medições realizadas por meio de apalpadores com raios de ponta de $2\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$ são estatisticamente distintas. Também nesse caso, foi adotado um valor de α igual a 0,05, para que as análises de variância conduzidas para cada parâmetro estudado tivessem um nível de confiança de 95 %. A Tabela 4.4 contém os resultados obtidos por meio ANOVA para cada parâmetro de rugosidade analisado, considerando como único fator o raio da ponta (RP).

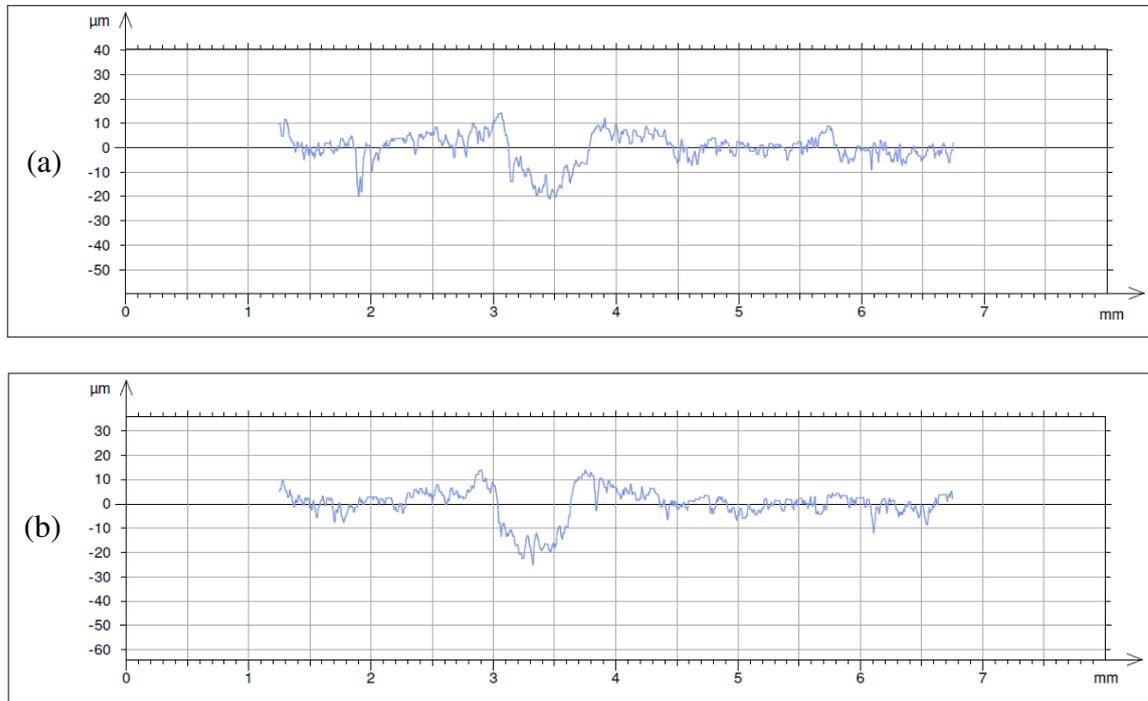


Figura 4.10 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície mandrilada do bloco de compressor 4 com os apalpadores com ponta de raio de $2\ \mu\text{m}$ (a) e com ponta de raio de $5\ \mu\text{m}$ (b).

Como o nível de confiança para as análises de variância é de 95 %, seria preciso que os p -valores fossem inferiores a 0,05 para que as medições dos parâmetros com os raios de ponta de $2\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$ fossem consideradas estatisticamente diferentes. Pela análise da Tab. 4.4, foi constatado que apenas o p -valor relativo ao parâmetro $R\Delta q$ foi inferior ao α especificado.

Deste modo, é possível afirmar, com um nível de confiança de 95 %, que as medições dos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a e R_q nas superfícies mandriladas com as pontas de $2\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$ não apresentaram diferenças estatísticas. Assim como para as superfícies fresadas, é possível utilizar os raios de ponta de $2\ \mu\text{m}$ ou $5\ \mu\text{m}$ para efetuar as medições desses parâmetros. Outro aspecto comum em relação às superfícies fresadas é o fato do parâmetro R_v apresentar p -valor superior, mas muito próximo a 0,05.

Tabela 4.4 – Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$ das superfícies mandriladas.

Parâmetro	Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0	p -valor
R_p	RP	0,714	1	0,714	0,389	0,540824
	Erro	33,087	18	1,838		
	Total	33,801	19			
R_v	RP	7,663	1	7,663	3,277	0,087004
	Erro	42,099	18	2,339		
	Total	49,762	19			
R_z	RP	12,96	1	12,96	2,345	0,143095
	Erro	99,50	18	5,53		
	Total	112,46	19			
R_t	RP	34,11	1	34,11	3,271	0,087234
	Erro	187,70	18	10,43		
	Total	221,81	19			
R_a	RP	0,0394	1	0,0394	0,200	0,660118
	Erro	3,5498	18	0,1972		
	Total	3,5892	19			
R_q	RP	0,1472	1	0,1472	0,622	0,440653
	Erro	4,2623	18	0,2368		
	Total	4,4095	19			
$R\Delta q$	RP	4,03	1	4,03	7,66	0,012683
	Erro	9,47	18	0,53		
	Total	13,5	19			

Também com o intuito de comparar os resultados das medições com os diferentes apalpadores nas superfícies fresadas e mandriladas, é apresentada a Fig. 4.11. Ela mostra as diferenças em porcentagem nas medições dos parâmetros de rugosidade efetuadas com as pontas de raios de 2 μm e 5 μm . Para todos os parâmetros medidos, a diferença entre as medições com ambas as pontas foi maior no fresamento, o que pode indicar que as superfícies fresadas possuem vales com porções mais estreitas e de difícil detecção pelas das pontas de raio de 5 μm .

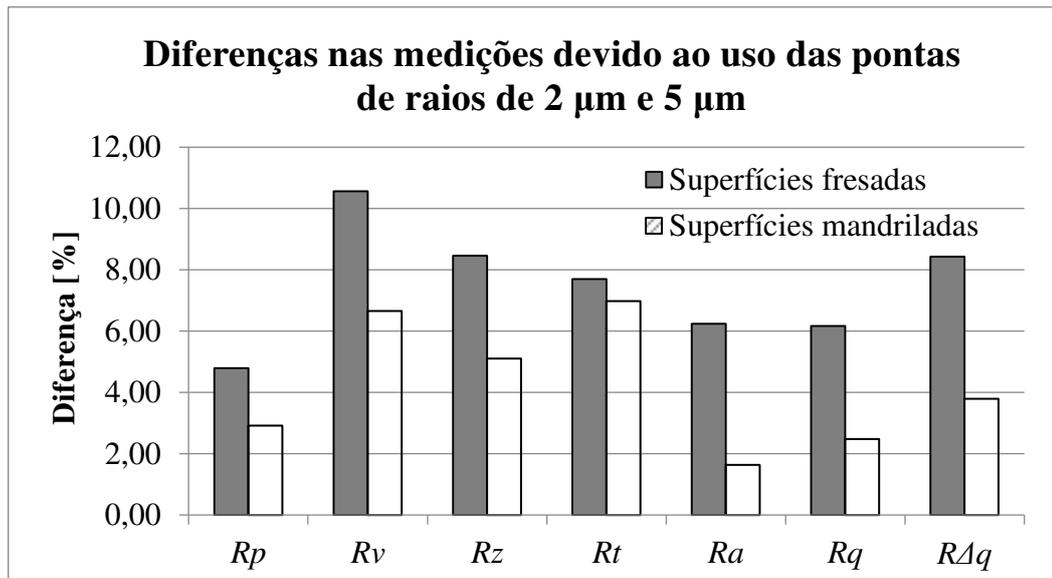


Figura 4.11 – Diferenças em porcentagem nas medições dos parâmetros de rugosidade efetuadas com as pontas de raios 2 μm e 5 μm nas superfícies fresadas e mandriladas.

4.3 Efeito do Raio da Ponta do Apalpador na Medição das Superfícies Brunidas

Os valores médios dos parâmetros de rugosidade medidos nas superfícies brunidas são exibidos por meio da Tab. 4.5, bem como os valores de incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

Tabela 4.5 – Valores médios dos parâmetros de rugosidade das superfícies brunidas utilizando os apalpadores com raios de ponta de 2 μm e 5 μm e suas respectivas incertezas expandidas U_P (95 %).

Parâmetro	Raio de ponta de 2 μm		Raio de ponta de 5 μm		Diferença percentual das médias
	Média	U_P (95 %)	Média	U_P (95 %)	
R_k [μm]	0,519	0,092	0,547	0,175	5,55 %
R_{pk} [μm]	0,281	0,084	0,316	0,171	12,21 %
R_{vk} [μm]	0,295	0,088	0,289	0,170	1,98 %

Pela análise da Tab. 4.5, é possível constatar que, no caso das superfícies brunidas medidas, os parâmetros R_k e R_{pk} se mostraram sensivelmente maiores quando medidos com a

ponta de raio de 5 μm . Já o parâmetro Rvk foi menor quando medido com esse mesmo raio de ponta. O comportamento dos parâmetros Rk , Rpk e Rvk nas medições efetuadas foi diferente daquele apresentado pelos parâmetros de rugosidade nas medições das superfícies fresadas e mandriladas, pois todos os valores médios dos parâmetros avaliados naqueles casos se mostraram maiores quando medidos com o apalpador com ponta de raio 2 μm .

Os valores contidos na Tab. 4.5 podem ser visualizados graficamente na Fig. 4.12. Os parâmetros Rk , Rpk e Rvk assumiram valores de 0,519 μm , 0,281 μm e 0,295 μm , respectivamente, quando coletados com o apalpador com raio de ponta de 2 μm . Os valores desses mesmos parâmetros foram 0,547 μm , 0,316 μm e 0,289 μm quando coletados com o apalpador com raio de ponta de 5 μm .

Ao observar as barras de erro, percebe-se que as incertezas das medições com a ponta de 5 μm são maiores. Ainda, é notável o fato de que as barras que representam as incertezas ficaram completamente sobrepostas para todos os parâmetros.

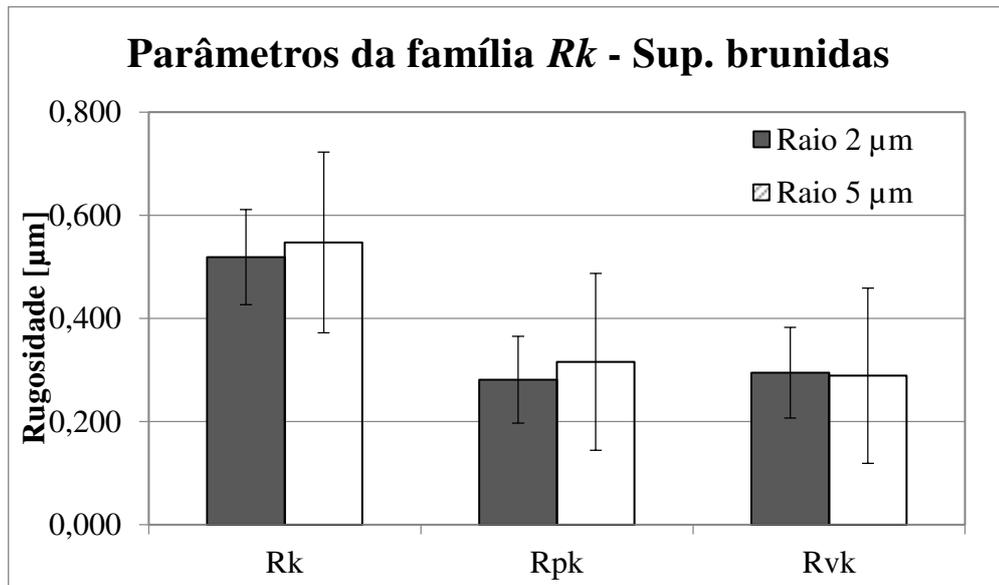


Figura 4.12 – Valores médios dos parâmetros da família Rk referentes às superfícies brunidas.

O fato dos valores de Rk e Rpk serem maiores nas medições efetuadas com a ponta de raio 5 μm era esperado. De acordo com Leach (2014), quando a ponta do apalpador percorre um pico, sua trajetória tende a ser mais arredondada do que a geometria desse pico, como indicado na Fig. 4.13. Desta forma, as pontas de raios maiores fazem com que os picos e as regiões centrais se tornem proporcionalmente mais volumosos, o que aumenta os valores dos parâmetros mencionados. Com relação ao Rvk , como os vales se caracterizam pela ausência

de material, o aumento do raio da ponta tende a fazer com que o valor desse parâmetro seja reduzido. Entretanto, nas condições experimentais investigadas, essa redução foi quase imperceptível.

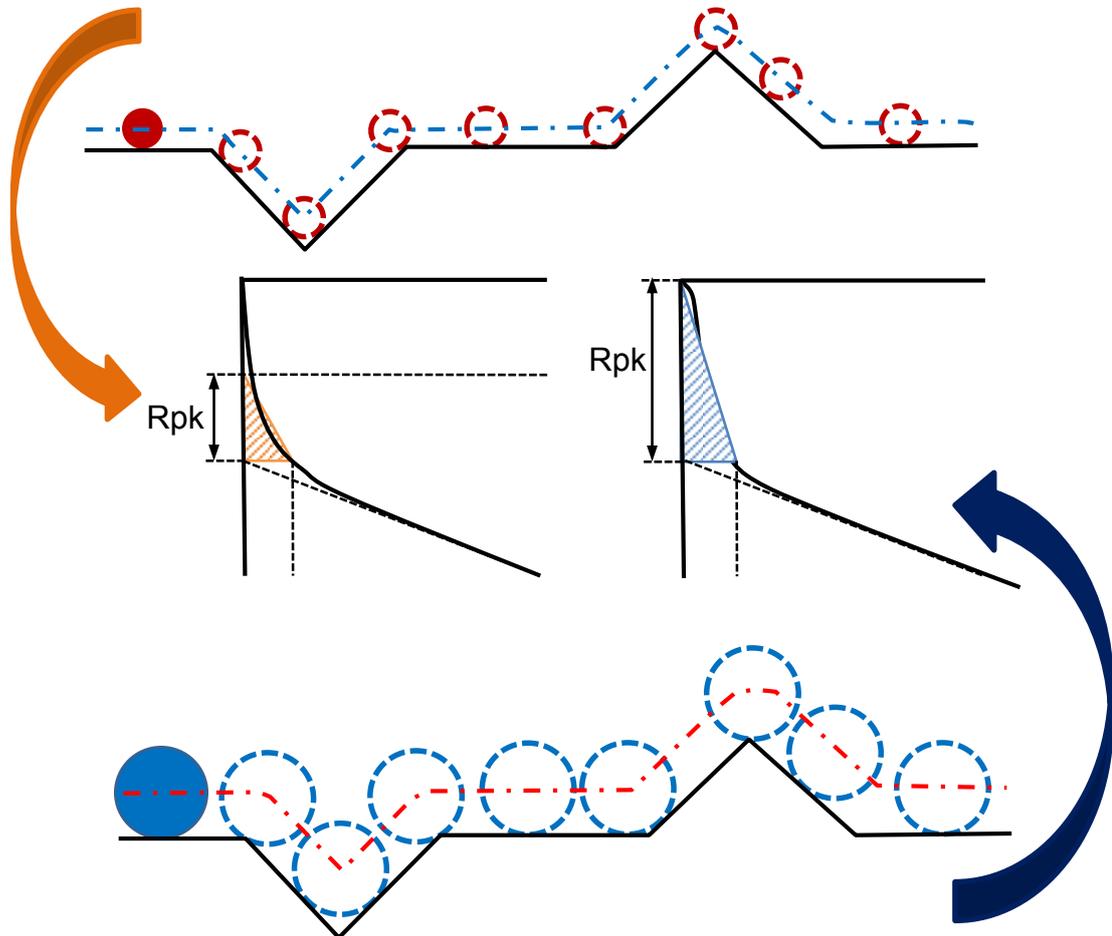


Figura 4.13 – Efeitos da ponta do raio do apalpador na medição do parâmetro Rpk (SOUZA et al., 2019).

A Figura 4.14 contém as diferenças entre os valores médios dos parâmetros obtidos pelas medições de rugosidade efetuadas com as pontas de raios de $2\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$ e os valores de incerteza expandida relativos às medições realizadas com a ponta de raio $2\ \mu\text{m}$. No caso das superfícies brunidas, todos os parâmetros analisados apresentaram valores de incertezas significativamente maiores em comparação com as diferenças detectadas por meio das medições com as duas pontas, o indica que a oscilação dos possíveis valores obtidos com a ponta de $2\ \mu\text{m}$ é superior à diferença das médias verificada.

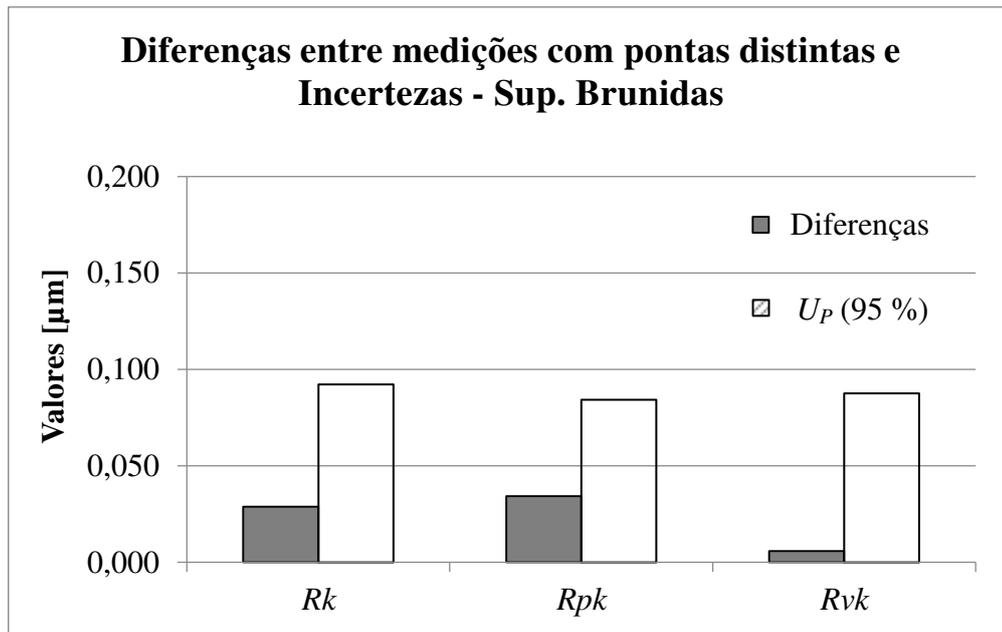


Figura 4.14 – Comparação das diferenças entre os valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos por meios das pontas e 2 μm e 5 μm e as incertezas expandidas (95 %) para as superfícies brunidas.

As Figuras 4.15 e 4.17 contêm o perfis de rugosidade das superfícies brunidas dos blocos dos compressores 5 e 9 coletados a partir das primeira medições com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (Fig. 4.15(a) e Fig. 4.17(a)) e com ponta de raio de 5 μm (Figs. 4.15(b) e 4.17(b)). As respectivas curvas de *Abbott-Firestone* são exibidas nas Figs. 4.16 e 4.18.

Observando o eixo vertical dos perfis de rugosidade das superfícies fresadas e mandriladas, percebe-se que alguns picos tinham a amplitude de 10 μm , enquanto alguns vales ultrapassavam 20 μm de profundidade. Além disso, o espaçamento médio existente entre os picos e vales é significativamente maior que aquele detectado nos perfis de rugosidade das superfícies brunidas. Nestas superfícies, foi observado que poucos picos e vales possuem valores de ordenadas iguais ou maiores que 1 μm . Além disso, os ângulos dos picos e vales obtidos pelo brunimento são muito acentuados.

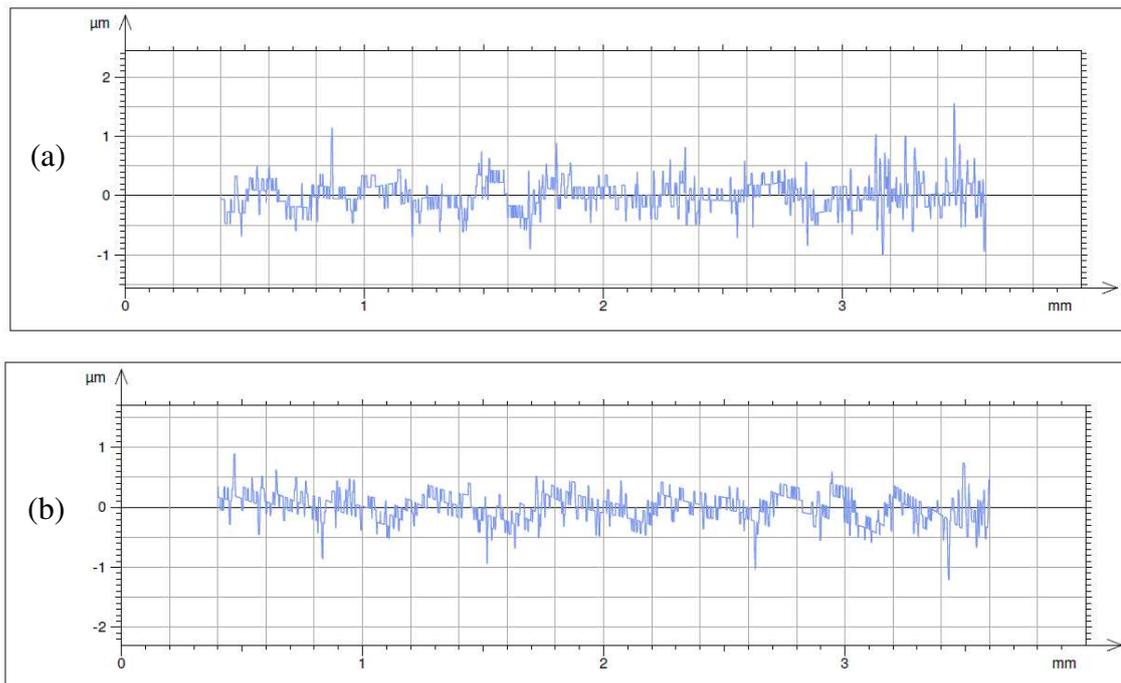


Figura 4.15 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 5 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

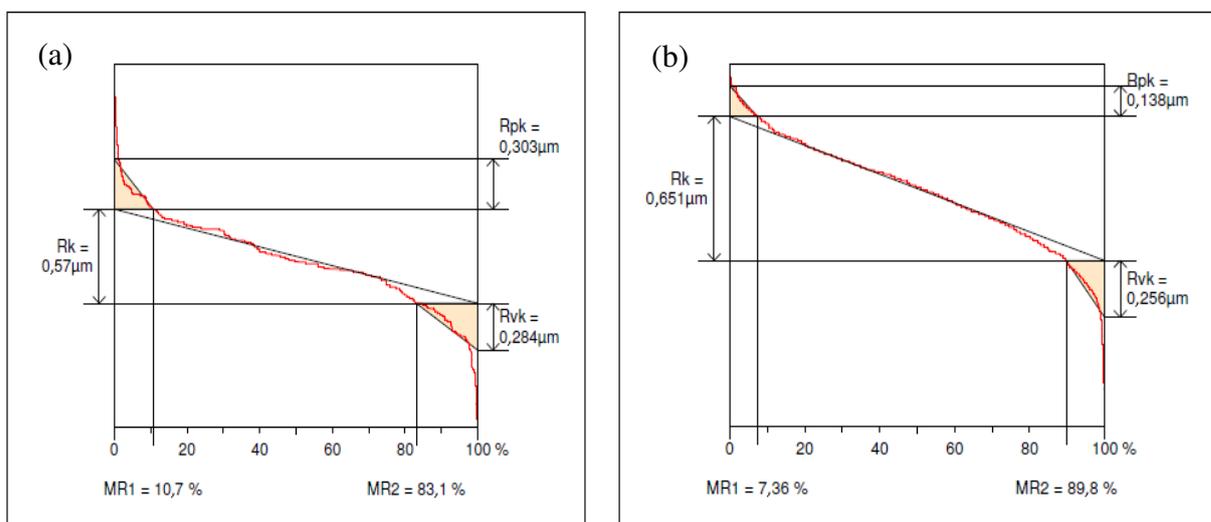


Figura 4.16 – Curva de *Abbott-Firestone* obtida na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 5 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

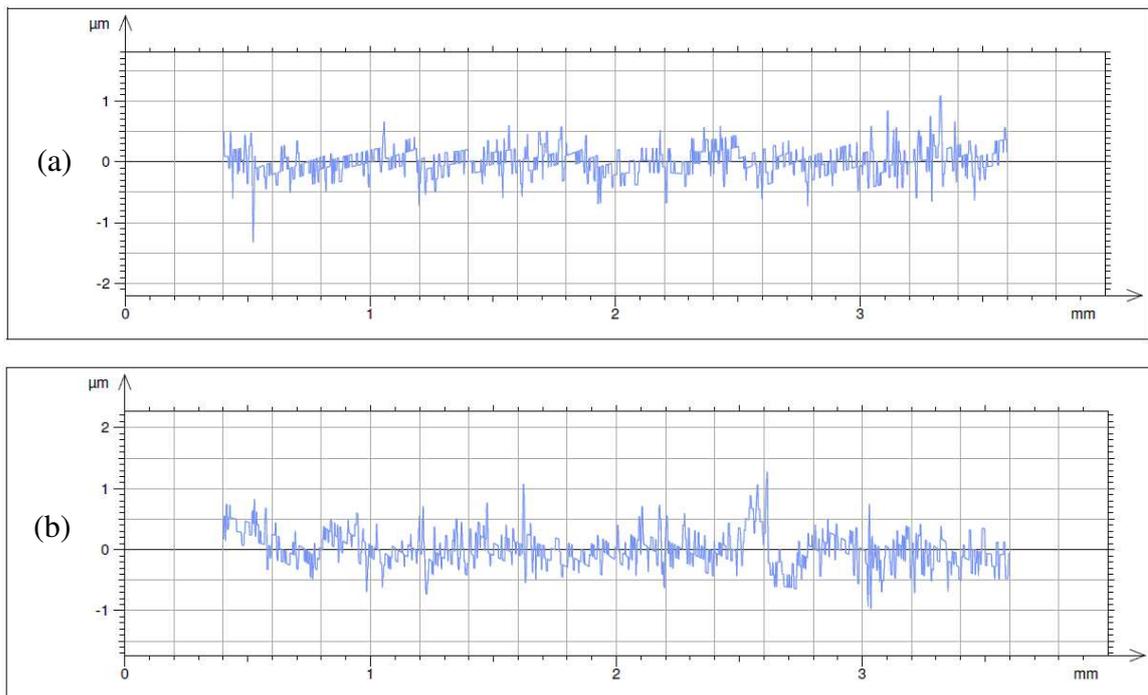


Figura 4.17 – Perfil de rugosidade obtido na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 9 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

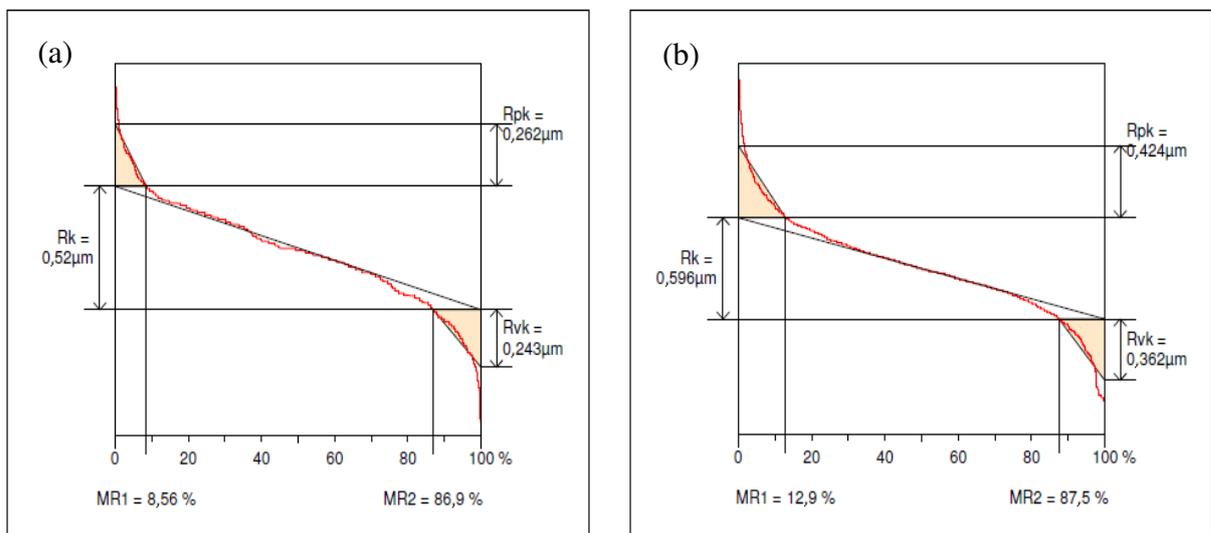


Figura 4.18 – Curva de *Abbott-Firestone* obtida na medição 1 da superfície brunida do bloco de compressor 9 com os apalpadores com ponta de raio de 2 μm (a) e com ponta de raio de 5 μm (b).

Para verificar se as diferenças obtidas após as medições de rugosidade das superfícies brunidas com diferentes raios de ponta são estatisticamente significativas para um nível de confiança de 95 %, foram realizados as análises de variância (ANOVA) para cada parâmetro. A Tabela 4.6 contém os resultados das análises efetuadas.

Como os p -valores obtidos para as medições dos parâmetros da família Rk das superfícies brunidas dos blocos de compressores ficaram acima de 0,05, não existe diferença estatisticamente significativa entre os valores das medições dos parâmetros mencionados com os apalpadores de pontas de 2 μm e 5 μm . Portanto, para as medições dos parâmetros da família Rk (Rk , Rpk e Rvk) nas superfícies brunidas, é possível utilizar qualquer uma das pontas analisadas.

Tabela 4.6 – Resultados das análises de variância (ANOVA) relativos aos parâmetros Rpk , Rk e Rvk das superfícies brunidas.

Parâmetro	Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0	p -valor
Rpk	RP	0,005896	1	0,005896	1,4151	0,249672
	Erro	0,075001	18	0,004167		
	Total	0,080906	19			
Rk	RP	0,004147	1	0,004147	0,6606	0,426966
	Erro	0,113002	18	0,006278		
	Total	0,117149	19			
Rvk	RP	0,000171	1	0,000171	0,0727	0,790482
	Erro	0,042209	18	0,002345		
	Total	0,042380	19			

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu a investigação sobre o efeito do raio da ponta do apalpador nos valores de vários parâmetros de rugosidade obtidos a partir de superfícies de blocos de compressores herméticos submetidos a diferentes processos de usinagem. O efeito do raio da ponta foi investigado em dois níveis (2 μm e 5 μm). Os processos de usinagem considerados foram fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional. Para as superfícies fresadas e mandriladas foram coletados os parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q e $R\Delta q$, enquanto que para as superfícies brunidas foram coletados os parâmetros R_k , Rpk e Rvk .

Com relação às superfícies fresadas e mandriladas, as seguintes conclusões foram formuladas:

- a) A análise de variância indicou com um nível de confiança de 95 % que o fator raio da ponta do apalpador provocou efeitos estatisticamente significativos no parâmetro híbrido $R\Delta q$. Para todos os parâmetros de amplitude avaliados, esse fator não provocou efeitos estatisticamente significativos. No entanto, é recomendado dar especial atenção ao parâmetro R_v cujo p -valor, apesar de ser superior a 0,05, está muito próximo desse número.
- b) Para a caracterização da rugosidade a partir dos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a e R_q é possível utilizar pontas de raios 2 μm e 5 μm . Para a medição do parâmetro $R\Delta q$, aconselha-se o uso da ponta de 2 μm somente.
- c) Os valores médios dos parâmetros de amplitude R_p , R_v , R_z , R_t , R_a e R_q e do parâmetro híbrido $R\Delta q$ obtidos por meio da ponta de 2 μm foram similares ou maiores

que aqueles obtidos com a ponta de 5 μm . Apesar disso, apenas a diferença relativa ao parâmetro $R\Delta q$ se mostrou estatisticamente significativa, conforme mencionado em (a);

- d) Para todos os parâmetros de amplitude, as barras de erro que representam os valores das incertezas expandidas (95 %) ficaram parcialmente sobrepostas, indicando que as faixas de valores que poderiam ser atribuídas ao mensurando são similares para ambas as condições investigadas (raios de ponta de 2 μm e 5 μm).

Com relação às superfícies brunidas, as conclusões foram:

- e) A análise de variância indicou com um nível de confiança de 95 % que o fator raio da ponta do apalpador não provocou efeitos estatisticamente significativos nos parâmetros Rk , Rpk e Rvk . Assim sendo, para a caracterização da rugosidade a partir dos parâmetros mencionados, os raios de ponta de 2 μm e 5 μm podem ser usados indistintamente.
- f) Os valores médios dos parâmetros Rk e Rpk obtidos por meio da ponta de 2 μm foram menores que aqueles obtidos com a ponta de 5 μm , enquanto os valores de Rvk foram similares para ambas as condições investigadas. Os valores dos parâmetros Rk , Rpk e Rvk foram respectivamente iguais a 0,519 μm , 0,281 μm e 0,295 μm quando medidos com a ponta de raio de 2 μm e de 0,547 μm , 0,316 μm e 0,289 μm quando medidos com ponta de raio de 5 μm .
- g) Os valores de incerteza expandida foram significativamente maiores quando a ponta de raio 5 μm foi utilizada. Para todos os parâmetros, as barras de erros que representam as incertezas expandidas ficaram parcialmente sobrepostas.
- h) As diferenças entre os valores obtidos por meio das pontas com raios de 2 μm e 5 μm são significativamente menores que as incertezas expandidas calculadas para os três parâmetros avaliados.

Os resultados apresentados contribuem com o aumento do conhecimento a respeito do efeito do raio da ponta do apalpador nos valores de rugosidade. Esses resultados auxiliam no processo de escolha do raio de ponta do apalpador mais adequado para medidas de rugosidade em condições semelhantes às aquelas avaliadas neste trabalho. Para a caracterização da rugosidade utilizando o parâmetro $R\Delta q$, recomenda-se o uso de pontas com raio menor, como

a de 2 μm . Já para a caracterização da rugosidade por meio dos parâmetros R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q , R_k , R_{pk} e R_{vk} , as pontas com raios de 2 μm e 5 μm podem ser usadas indistintamente.

Foi possível constatar também a eficácia do teste t combinado e da Análise de Variância (ANOVA), pois ambos possibilitaram distinguir os casos nos quais as diferenças de valores de rugosidade obtidos por meio das pontas de raios distintos eram estatisticamente significativas, considerando um nível de confiança adequado para esta aplicação.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos após a realização deste trabalho, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- a) Avaliar o efeito dos raios de ponta de 2 μm e 5 μm nos valores dos parâmetros de rugosidade de superfícies submetidas aos processos de retificação, lapidação e polimento;
- b) Avaliar o efeito do raio de ponta de 10 μm nos valores dos parâmetros de rugosidade das superfícies fresadas, mandriladas e brunidas dos blocos de compressores herméticos;
- c) Comparar os efeitos dos ângulos de cone de 60° e 90° dos palpadores nas medições dos parâmetros de rugosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARON, T. **Grinding, Honing and Lapping**. ASM Handbook - Machining, ASM International, 1995.

ARANTES, L. J.; FERNANDES, K. A.; SCHRAMM, C. R.; LEAL, J. E. S.; PIRATELLI-FILHO, A.; FRANCO, S. D.; ARENCIBIA, R. A. **The Roughness Characterization in Cylinders Obtained by Conventional and Flexible Honing Processes**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0544-2>

ARENCIBIA, R. V.; PIRATELLI-FILHO, A.; LEAL, J. E. S.; ROSA, V. A. O. **Incerteza de Medição - Metodologia de Cálculo, Conceitos e Aplicações**. Editora Interciência, ISBN: 9788571934269, 1ª Edição, 2019. 248 p.

AROLA, D. D.; YANG, D. T.; STOFFEL, K. A. **The Apparent Volume of Interdigitation : A New Parameter for Evaluating the Influence of Surface Topography on Mechanical Interlock**, Journal of Biomedical Materials Research, 2001. Pp. 519-524. <https://doi.org/10.1002/jbm.1049>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 3274: Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Características Nominais de Instrumentos por Contato (Ponta 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, 2002. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 4288: Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil - Regras e Procedimentos para Avaliação de Rugosidade, 2008. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração. Rio de Janeiro, 2017, 20 p.

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, 2001. 76p.

BÄHRE, D.; SCHMITT, C.; MOOS, U. **Analysis of the Differences Between Force Control and Feed Control Strategies During the Honing of Bores**. Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Suíça, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.067>

BARBOSA, R. S. **Avaliação dos Esforços de Corte no Fresamento Frontal da Liga de Alumínio-Silício (A356) Quando Mantida Constante a Produção de Peças**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei, Brasil, 2014. 84p.

BARROS, G. H. C.; SCHRAMM, C. R.; FRANCO, S. D.; ARANTES, L. J.; ARENCIBIA, R. V. **Effect of Grain Size and Number of Strokes on Rk Parameters and Emptiness Coefficient in Honing Process**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. Pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03810-2>

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Chapter 2: Surface roughness analysis and measurement techniques, 2000. Pp. 49-120. <https://doi.org/10.1201/9780849377877.ch2>

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, **JCGM 100 - Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, 2008.

CHAND, M.; MEHTA, A.; SHARMA, R.; OJHA, V. N.; CHAUDHARY, K. P. **Roughness Measurement Using Optical Profiler with Self-Reference Laser and Stylus Instrument - A Comparative Study**. Indian Journal of Pure & Applied Physics, V 49, 2011. 335-339p.

CORRAL, I. B.; CALVET, J. V.; SALCEDO, M. C. **Use of Roughness Probability Parameters to Quantify the Material Removed in Plateau-Honing**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, V 50, 2010. Pp. 621-629. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.02.007>

DALO, M. A. **Estudo do Desempenho de Ferramenta de Corte no Processo de Mandrilamento em Ferro Fundido Vermicular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2011. 110p.

DOBES, J.; LEAL, J. E. S.; PROFETA, J.; SOUSA, M. M.; LÉPORE-NETO, F. P.; PIRATELLI-FILHO, A.; ARENCIBIA, R. V. **Effect of Mechanical Vibration on R_a , R_q , R_z and R_t Roughness Parameters**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 92, Issue 1-4, 2017. Pp. 393-406. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0137-0>

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1970. 751p.

GODINHO, A. F. C. E. **Análise do Mandrilamento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular com Diferentes Concepções de Ferramentas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007. 129p.

HAITJEMA, H. **Uncertainty Analysis of Roughness Standard Calibration Using Stylus Instruments**. Precision Engineering, v. 22 1998. Pp. 110-119. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(97\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(97)00090-1)

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. Rio de Janeiro, Brasil, 2012. 95p.

INMETRO. A Estimativa da Incerteza de Medição pelos Métodos do ISO GUM 95 e de Simulação de Monte Carlo. INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO. Nota técnica, 2008. 34p.

INMETRO. SI - Sistema Internacional de Unidades, 2012. 94p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13565-2: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method; Surfaces Having Stratified Functional Properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve, 1996. 6p.

ISO TAG 4/WG 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Suíça, 2008. 141p.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding Honing and Lapping**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 405p.

LEACH, R. **The Measurement of Surface Texture Using Stylus Instruments. Measurement Good Practice Guide No. 37**. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, Reino Unido, 2014. 110p.

LEE D-H.; CHO, N-G. **Assessment of Surface Profile Data Acquired by a Stylus Profilometer**. Meas Sci Technol 23:105601, 2012. 12 p. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105601>

MITUTOYO. Guia Rápido para Instrumentos SurfTest de Medição de Precisão. SurfTest (Rugosímetro), 2016. 2p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4^a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009. 490p.

MOTTA-NETO, W. S.; LEAL, J. E. S.; ARANTES, L. J.; ARENCIBIA, R. V. **The Effect of Stylus Tip Radius on Ra, Rq, Rp, Rv and Rt Parameters in Turned and Milled Samples.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V 99, Issue 5-8, 2018. Pp. 393-406. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2630-5>

MÜSER, M. H. **A Dimensionless Measure for Adhesion and Effects of the Range of Adhesion in Contacts of Nominally Flat Surfaces.** Tribology International, Volume 100, 2016. Pp. 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.010>

NAKAR, D.; FEUERMANN, D. **Surface Roughness Impact on the Heat Loss of Solar Vacuum Heat Collector Elements (HCE).** Renewable Energy, 96, 2016. Pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.041>

NAKAR, D.; HAREL D.; HIRSCH, B. **Electropolishing Effect on Roughness Metrics of Ground Stainless Steel: A Length Scale Industry.** IOP Publishing: Surface Topography: Metrology and Properties, V 6, N 1, 2018. 18p. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/aa9bf8>

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica.** ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo. Brasil, 2013. 252p.

ODEBRECHT, O. **Dressamento de Rebolos de Óxido de Alumínio Microcristalino com Dressadores Fixos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003. 118p.

OLIVEIRA, C. J. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfícies em Usinagens.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2004. 135p.

PEREIRA, L. C.; ARENCIBIA, R. V.; SCHRAMM, C. R.; ARANTES, L. J. **Assessment of the Effect of Cutting Parameters on Roughness in Flexible Honed Cylinders.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 95, Issue 1-4, 2017. Pp. 181-196. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1200-6>

PIRATELLI-FILHO, A. **Rugosidade Superficial**. Palestra, 3º Seminário de Metrologia, Uberlândia, Brasil, 2011.

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.
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06697-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06697-7)

PROUDHON, H.; FOUVRY, S.; BUFFIÈRE, J. Y. **A Fretting Crack Initiation Prediction Taking Into Account the Surface Roughness and the Crack Nucleation Process Volume**. *International Journal of Fatigue*, Volume 27, 2005. Pp. 569-579.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.001>

RAJA, J.; MURALIKRISHNAN B.; FU, S.; LIU, X. **Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form**. *Precision Engineering*, V 26, N 2, 2002. 222-235 p.
[https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00103-4)

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. **An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)**. *Biometrika Trust, Londres*, V 52, 1965. p. 591–609.
<https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SMITH, G. T. **Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology**. IFS Publications, 1989.

SONG, J.; RENEGAR, T. B.; SOONS, J.; MURALIKRISHNAN, B.; VILLARUBIA, J.; ZHENG, A.; VORBURGER, T. V. **The Effect of Tip Size on the Measured *Ra* of Surface Roughness Specimens with Rectangular Profiles**. Elsevier, V 38, Issue 1, 2014. Pp. 217-220. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.07.001>

SOUZA, A. J., **Apostila de Processos de Fabricação por Usinagem - Parte 1**. UFRGS, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio Grande do Sul, 2011. 89p.

SOUZA, C. C.; ARANTES, L. J.; PIRATELLI-FILHO, A.; ARENCIBIA, R. V. **Assessment of the Effect of Stylus Tip Radius on Milled, Bored and Honed Surfaces**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. Pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04083-5>

STOUT, K.; BLUNT, L.; DONG, W.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; SULLIVAN, P.; ZAHOUANI, H. **The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions**. Elsevier Science, 2000. 358 p.

TAYLOR HOBSON. Surface Finish Metrology. 2003. 329 slides.

TESSLER, M. B.; BARBOSA, C. A. **A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Metalurgia e Materiais - ABM, V 49, N 413, 1993. Pp. 32-41.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface and Nanometrology: Second Edition**. Coventry, Reino Unido. 2011. 955 p. <https://doi.org/10.1201/b10415>

YOSHIDA, I.; TSUKADA, T. **Uncertainty of Wavelength Limitation Due to Stylus Tip Radius for Engineering Surface Texture Based on Wavelength and Amplitude by FFT**. Wear. Volume 261, Issues 11–12, 20, 2006, Pp. 1225-1231. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.006>

APÊNDICE I – VALORES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE MEDIDOS

Medições das Superfícies Fresadas (raio de ponta de 2 μm)

	R_p [μm]	R_v [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_q [μm]	$R\Delta q$ [°]
Bloco 1	7,35	16,72	24,08	28,82	3,14	4,10	13,86
Bloco 2	8,12	15,48	23,60	29,46	3,06	3,93	13,78
Bloco 3	10,13	15,46	25,58	34,88	4,38	5,27	13,14
Bloco 4	7,72	18,08	25,82	33,48	3,19	4,28	13,56
Bloco 5	11,76	20,34	32,12	41,48	4,75	5,95	14,76
Bloco 6	11,86	20,34	32,24	40,54	4,16	5,37	14,68
Bloco 7	11,14	16,66	27,80	35,30	4,49	5,43	13,90
Bloco 8	6,74	15,96	22,66	33,24	3,21	4,07	13,08
Bloco 9	10,28	17,26	27,54	34,14	4,68	5,62	14,06
Bloco 10	11,04	15,80	26,84	32,06	4,65	5,54	13,74
Média	9,61	17,21	26,83	34,34	3,97	4,96	13,86
Desvio Padrão	1,94	1,84	3,28	4,11	0,72	0,77	0,55

Medições das Superfícies Fresadas (raio de ponta de 5 μm)

	R_p [μm]	R_v [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_q [μm]	$R\Delta q$ [°]
Bloco 1	7,64	14,96	22,56	30,14	2,99	3,94	12,48
Bloco 2	6,94	15,18	22,12	32,72	3,10	4,04	12,42
Bloco 3	10,03	12,86	22,92	30,00	4,12	4,84	12,30
Bloco 4	7,63	11,19	18,86	23,14	2,69	3,44	11,18
Bloco 5	10,12	18,94	29,10	36,22	4,56	5,58	13,48
Bloco 6	10,84	17,16	27,98	35,30	4,31	5,59	13,32
Bloco 7	9,87	16,88	26,78	34,04	4,24	5,09	13,02
Bloco 8	7,57	15,38	22,96	31,70	2,97	3,85	12,42
Bloco 9	10,23	16,52	26,78	34,16	4,03	5,06	13,48
Bloco 10	10,66	14,86	25,52	29,54	4,22	5,08	12,78
Média	9,15	15,39	24,56	31,70	3,72	4,65	12,69
Desvio Padrão	1,51	2,21	3,18	3,79	0,70	0,77	0,70

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE MEDIDOS

Medições das Superfícies Mandriladas (raio de ponta de 2 μm)

	<i>Rp</i> [μm]	<i>Rv</i> [μm]	<i>Rz</i> [μm]	<i>Rt</i> [μm]	<i>Ra</i> [μm]	<i>Rq</i> [μm]	<i>RΔq</i> [°]
Bloco 1	12,04	19,28	31,32	34,32	5,44	6,92	23,68
Bloco 2	13,38	21,66	35,06	39,12	5,54	7,22	23,80
Bloco 3	12,74	16,94	29,68	35,04	5,15	6,66	24,50
Bloco 4	12,20	17,34	29,54	33,70	4,80	6,31	23,44
Bloco 5	13,50	17,72	31,18	38,64	5,46	6,81	24,68
Bloco 6	12,22	18,26	30,44	37,32	5,37	6,67	23,96
Bloco 7	11,86	19,26	31,14	35,88	5,69	6,98	23,20
Bloco 8	11,94	17,22	29,14	35,46	4,75	6,33	22,46
Bloco 9	13,08	17,98	31,04	40,40	5,79	7,07	23,52
Bloco 10	16,54	20,40	36,98	44,34	6,11	8,07	23,20
Média	12,95	18,61	31,55	37,42	5,41	6,90	23,64
Desvio Padrão	1,40	1,53	2,52	3,27	0,42	0,51	0,65

Medições das Superfícies Mandriladas (raio de ponta de 5 μm)

	<i>Rp</i> [μm]	<i>Rv</i> [μm]	<i>Rz</i> [μm]	<i>Rt</i> [μm]	<i>Ra</i> [μm]	<i>Rq</i> [μm]	<i>RΔq</i> [°]
Bloco 1	12,12	18,18	30,32	32,16	5,57	7,07	22,32
Bloco 2	11,88	20,14	32,08	34,40	5,61	7,13	23,22
Bloco 3	11,96	16,34	28,30	35,76	5,14	6,45	23,26
Bloco 4	13,32	17,22	30,46	37,00	4,79	6,35	22,08
Bloco 5	13,22	14,78	28,00	34,20	4,96	6,40	23,26
Bloco 6	12,70	16,94	29,64	36,24	5,25	6,52	23,16
Bloco 7	10,88	15,78	26,64	29,46	5,37	6,71	20,86
Bloco 8	11,26	17,46	28,74	31,12	4,60	5,99	22,76
Bloco 9	12,84	18,30	31,16	38,36	6,06	7,37	23,14
Bloco 10	15,54	18,54	34,08	39,40	5,86	7,33	23,40
Média	12,57	17,37	29,94	34,81	5,32	6,73	22,75
Desvio Padrão	1,31	1,53	2,17	3,18	0,46	0,47	0,80

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE MEDIDOS

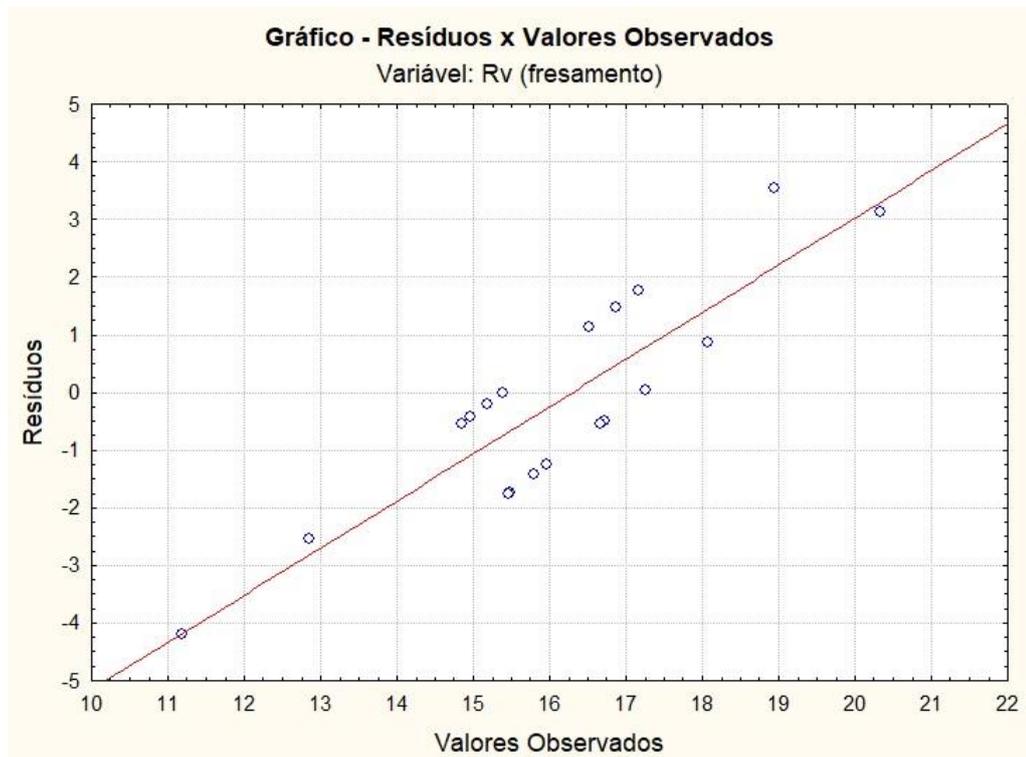
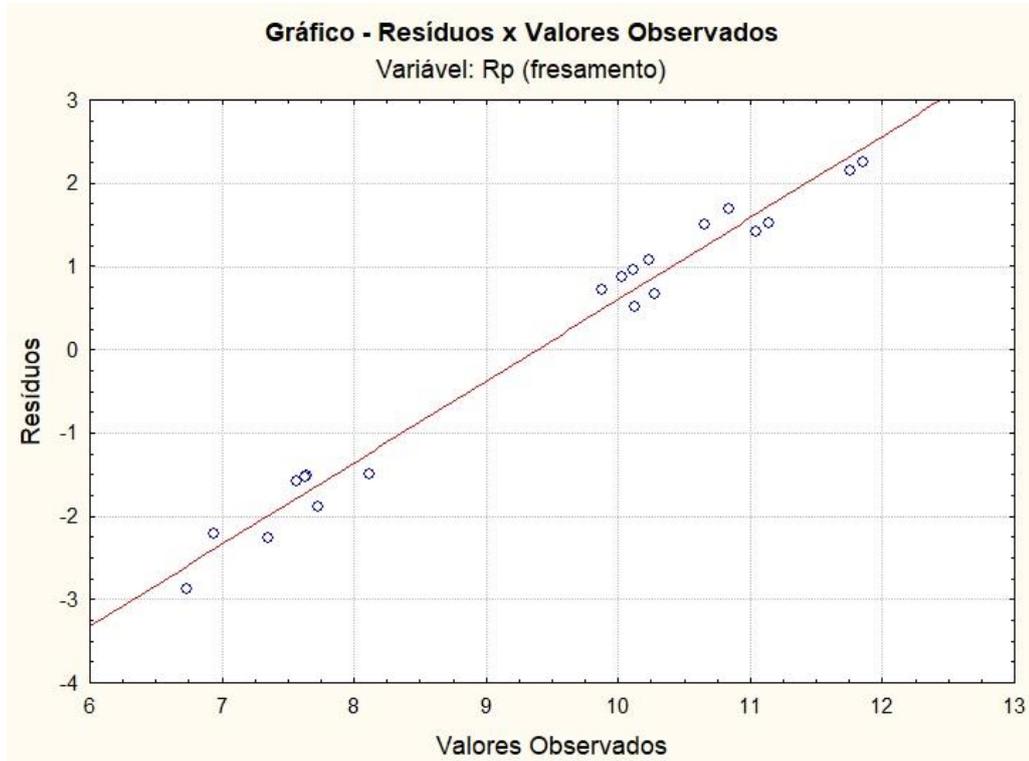
Medições das Superfícies Brunidas (raio de ponta de 2 μm)

	<i>Rk</i> [μm]	<i>Rpk</i> [μm]	<i>Rvk</i> [μm]
Bloco 1	0,442	0,203	0,277
Bloco 2	0,522	0,272	0,268
Bloco 3	0,536	0,289	0,310
Bloco 4	0,501	0,296	0,401
Bloco 5	0,546	0,299	0,297
Bloco 6	0,691	0,379	0,338
Bloco 7	0,434	0,334	0,234
Bloco 8	0,450	0,195	0,276
Bloco 9	0,552	0,274	0,279
Bloco 10	0,513	0,272	0,267
Média	0,519	0,281	0,295
Desvio Padrão	0,075	0,054	0,047

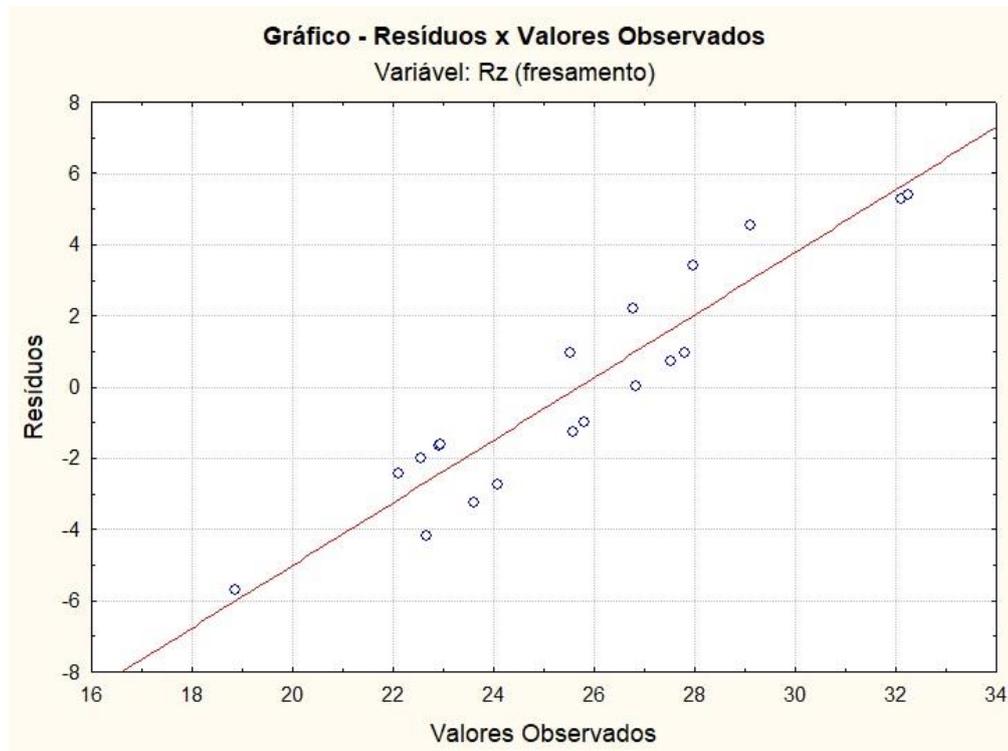
Medições das Superfícies Brunidas (raio de ponta de 5 μm)

	<i>Rk</i> [μm]	<i>Rpk</i> [μm]	<i>Rvk</i> [μm]
Bloco 1	0,550	0,328	0,328
Bloco 2	0,555	0,392	0,347
Bloco 3	0,644	0,373	0,329
Bloco 4	0,498	0,303	0,307
Bloco 5	0,615	0,196	0,281
Bloco 6	0,614	0,388	0,275
Bloco 7	0,355	0,203	0,198
Bloco 8	0,555	0,308	0,226
Bloco 9	0,594	0,388	0,338
Bloco 10	0,494	0,279	0,258
Média	0,547	0,316	0,289
Desvio Padrão	0,084	0,073	0,050

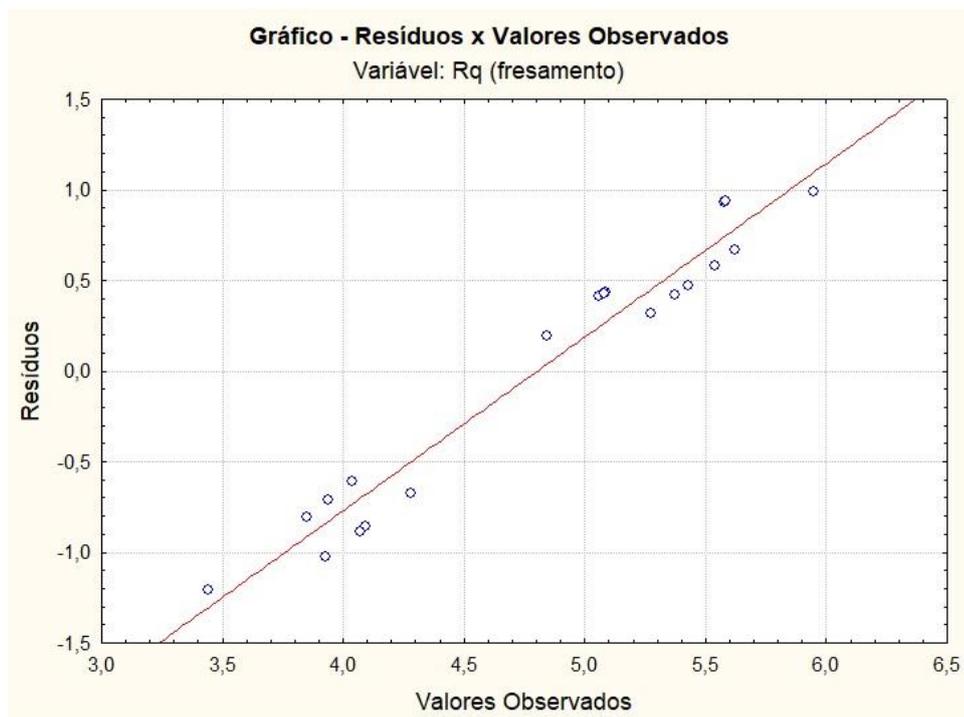
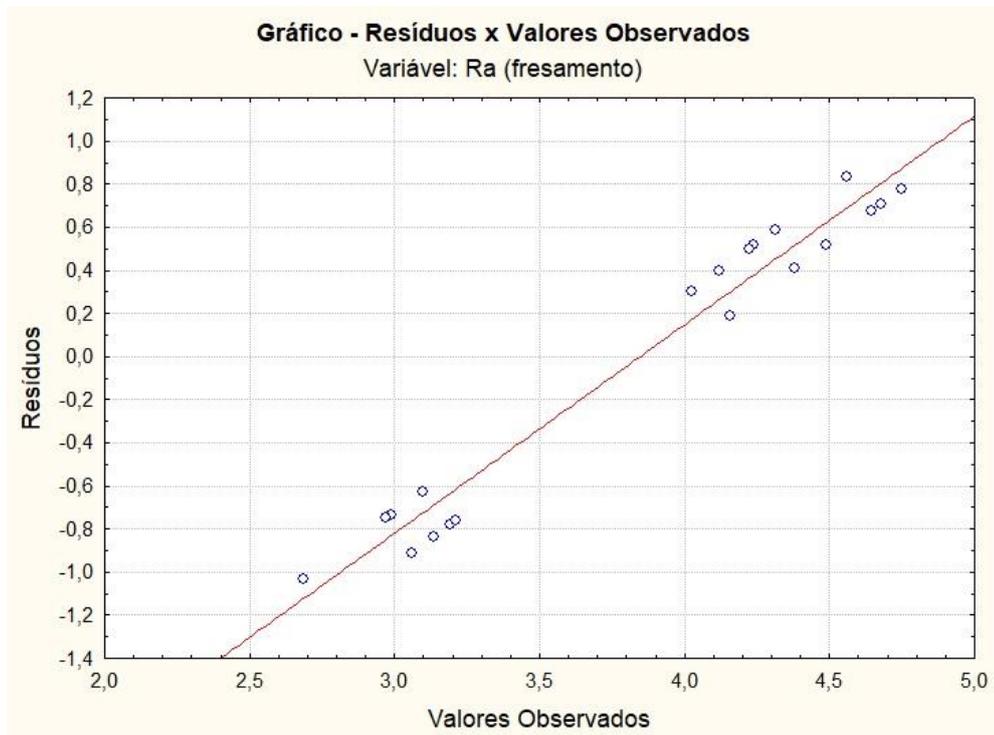
APÊNDICE II – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



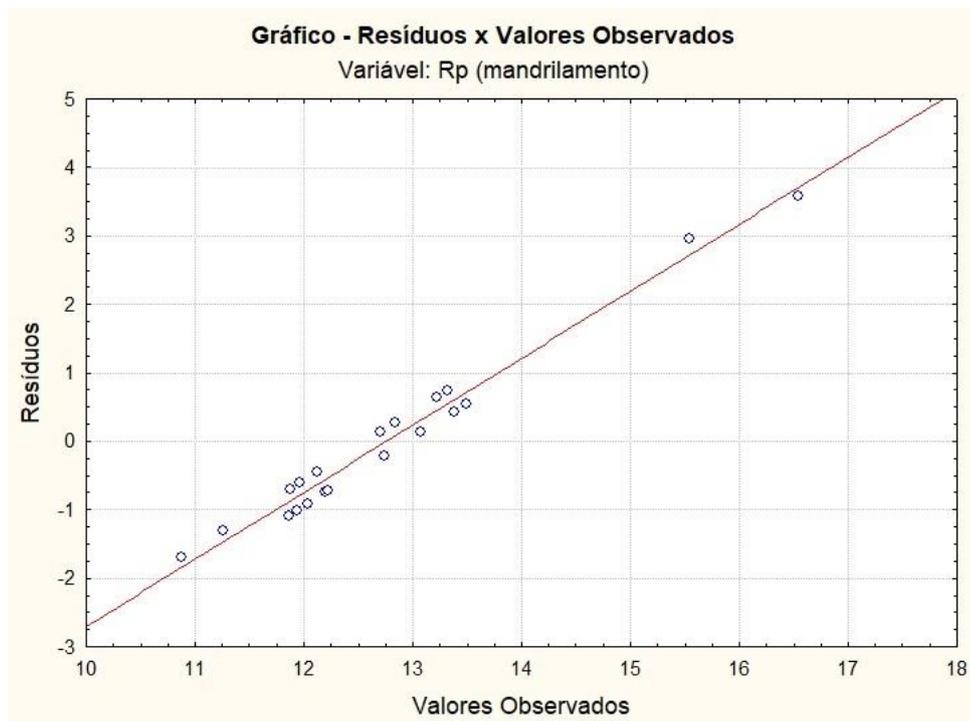
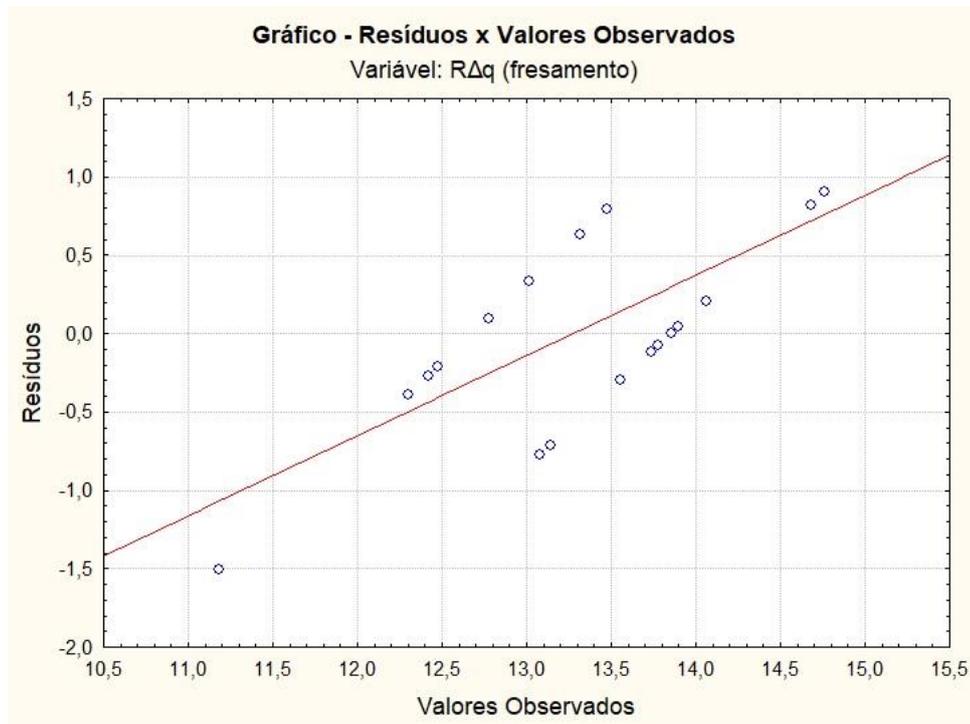
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



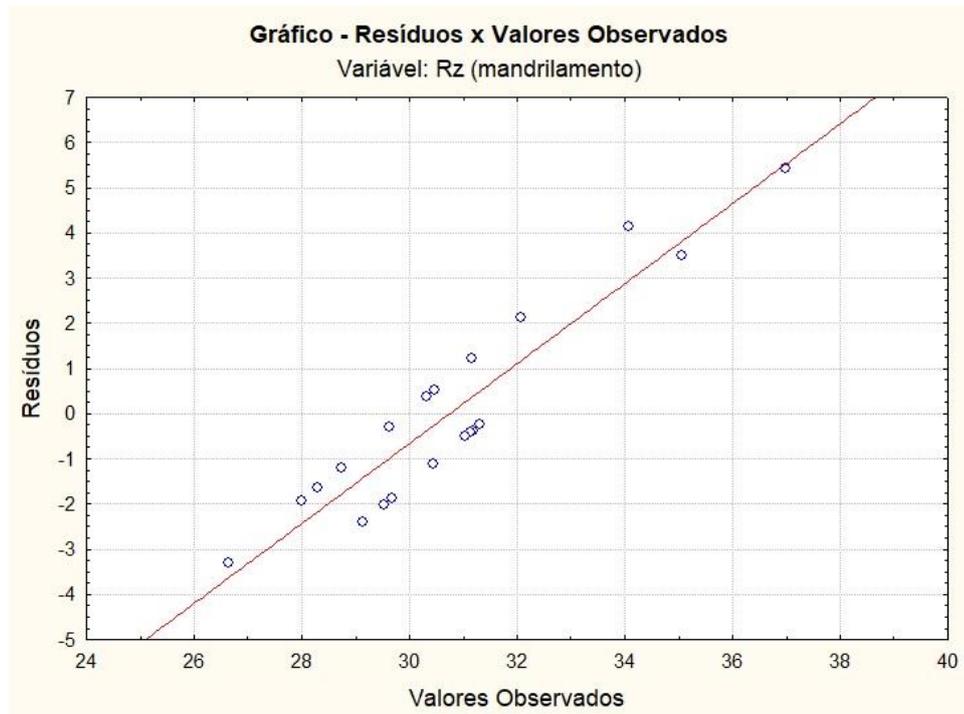
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



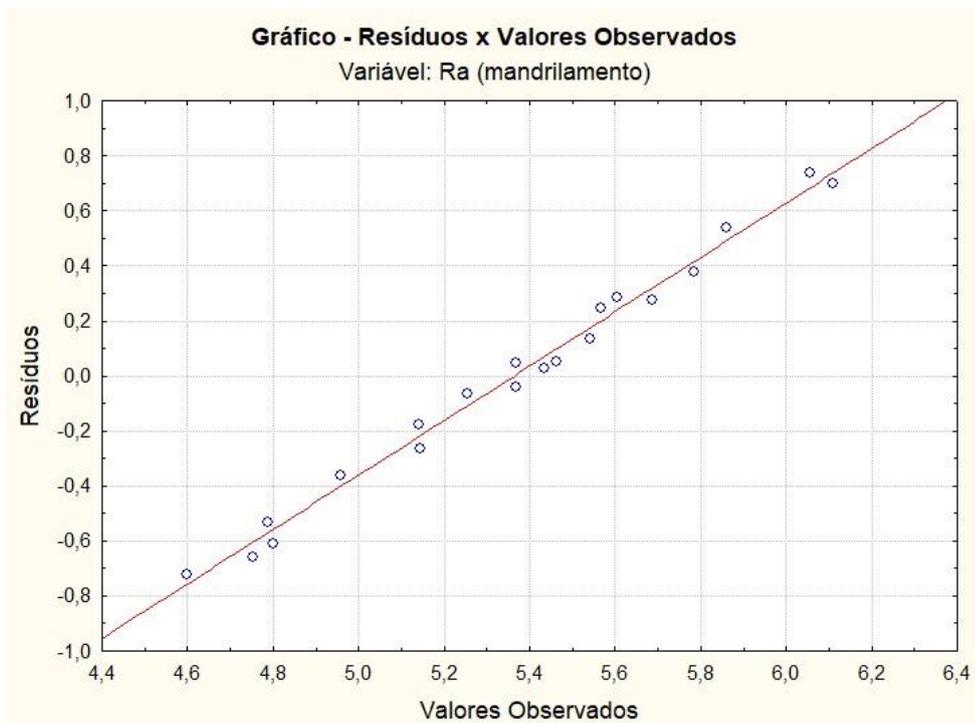
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



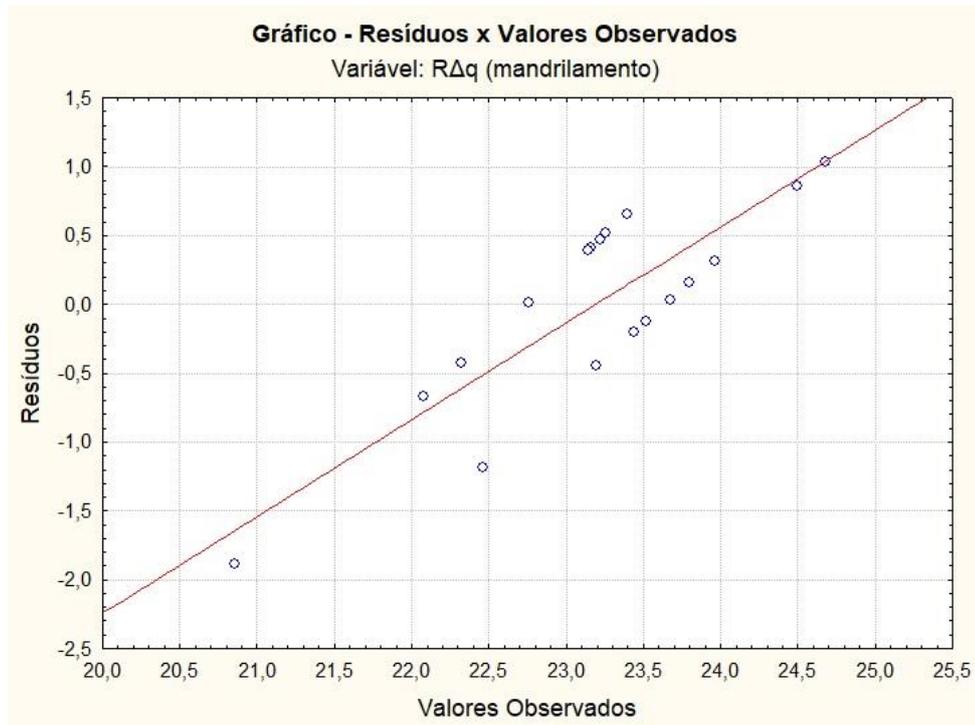
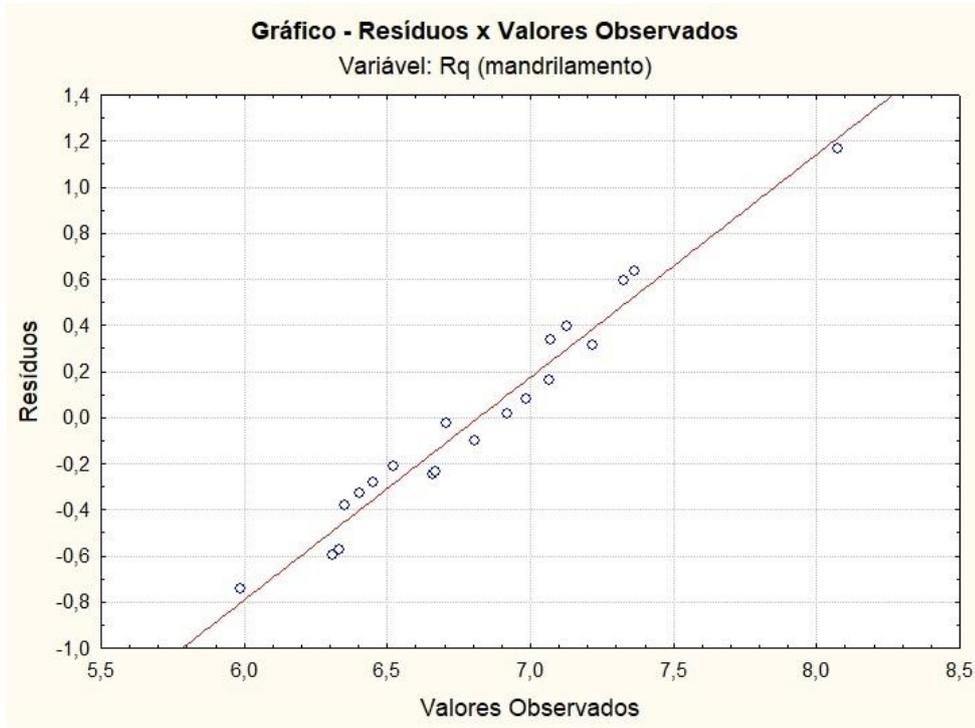
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



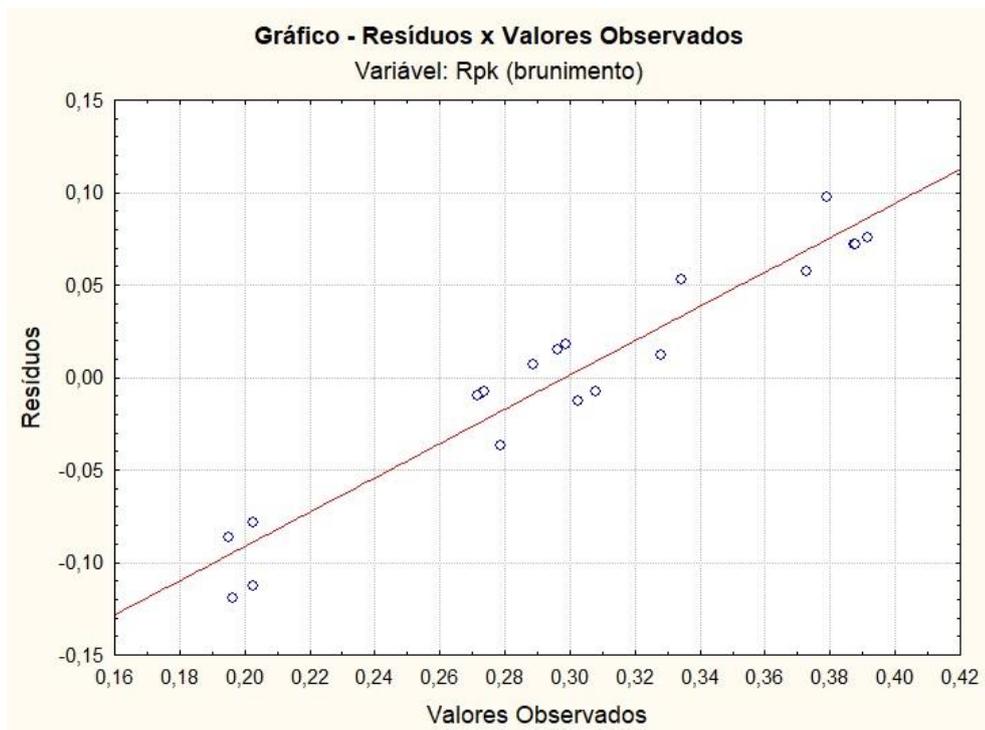
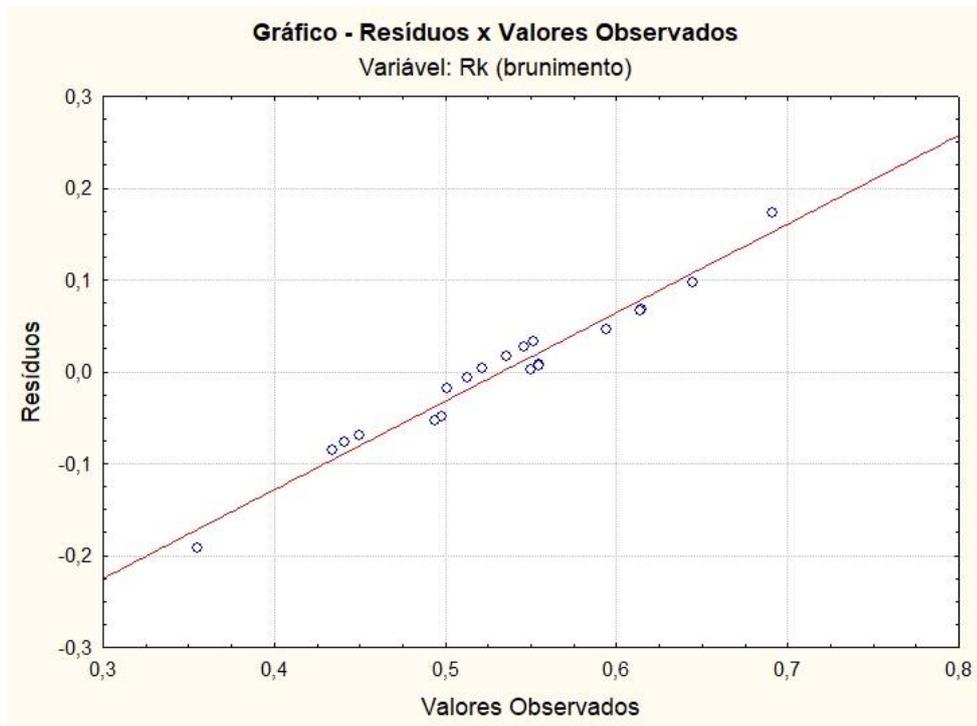
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



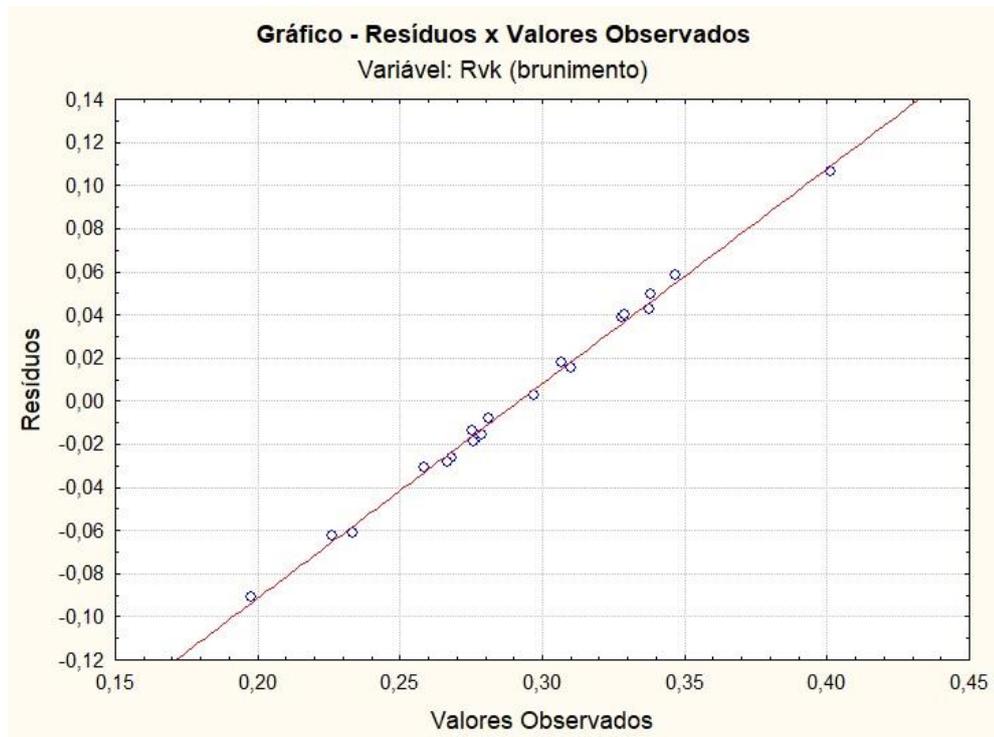
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



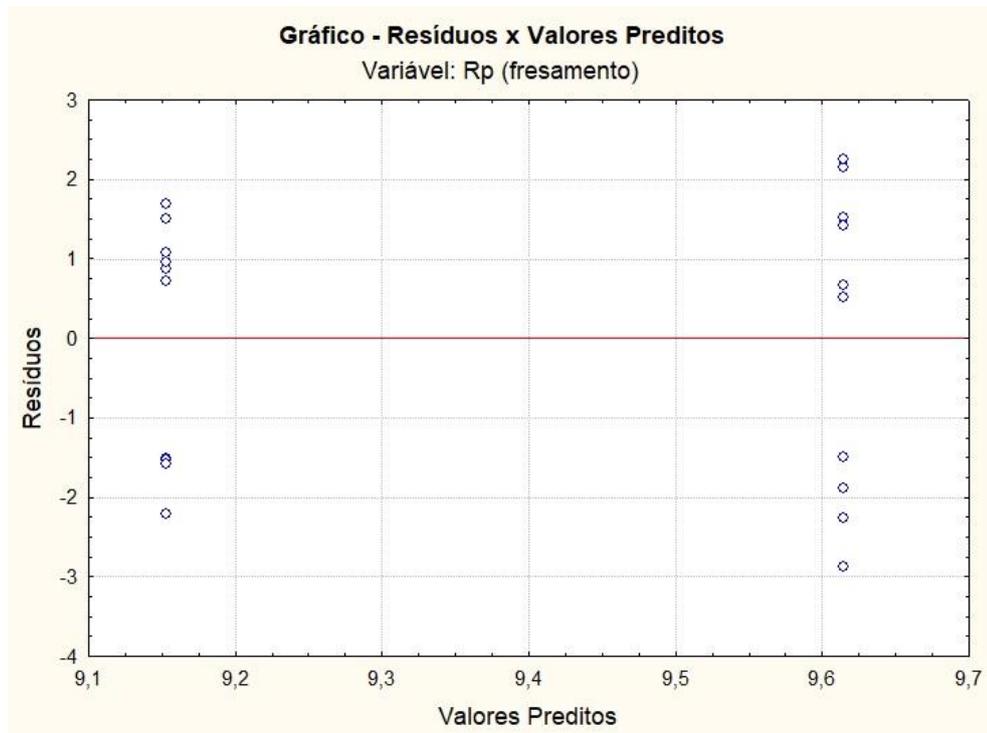
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



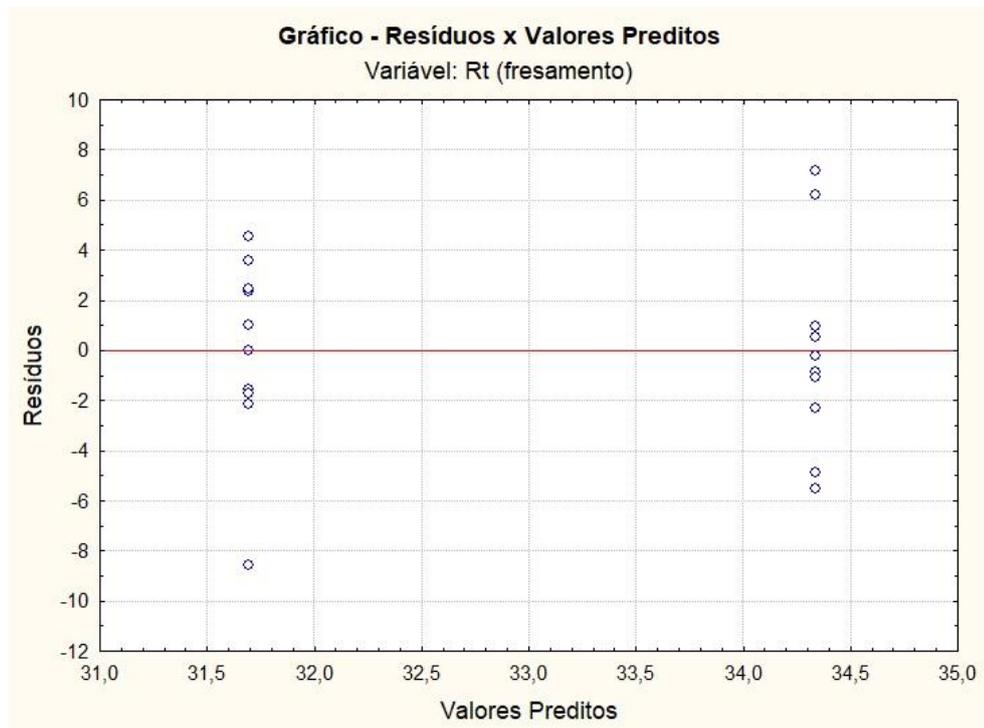
APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS



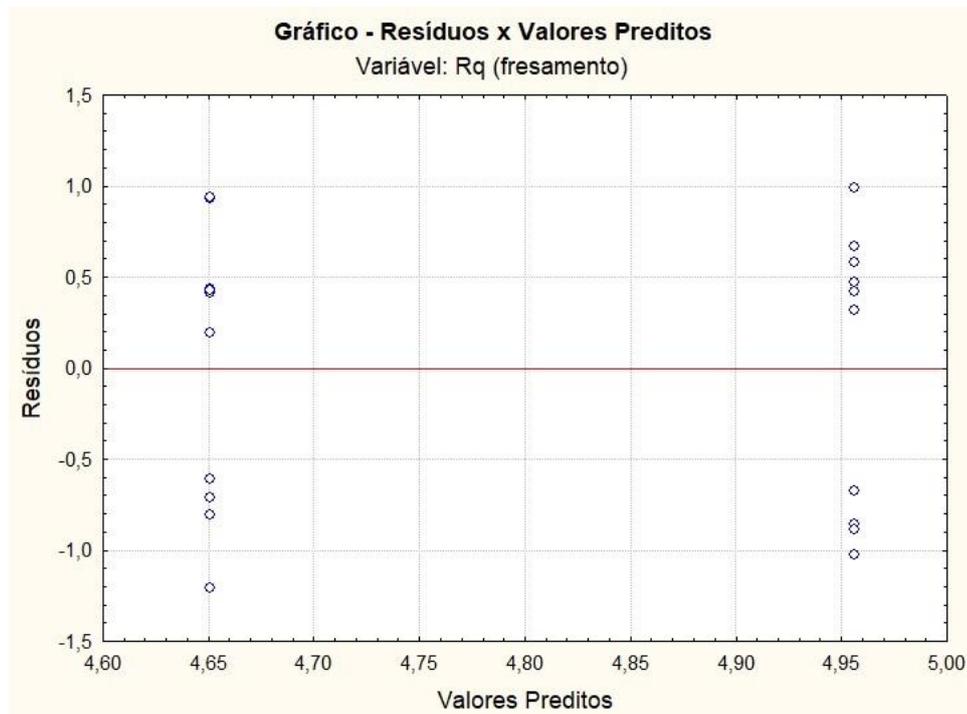
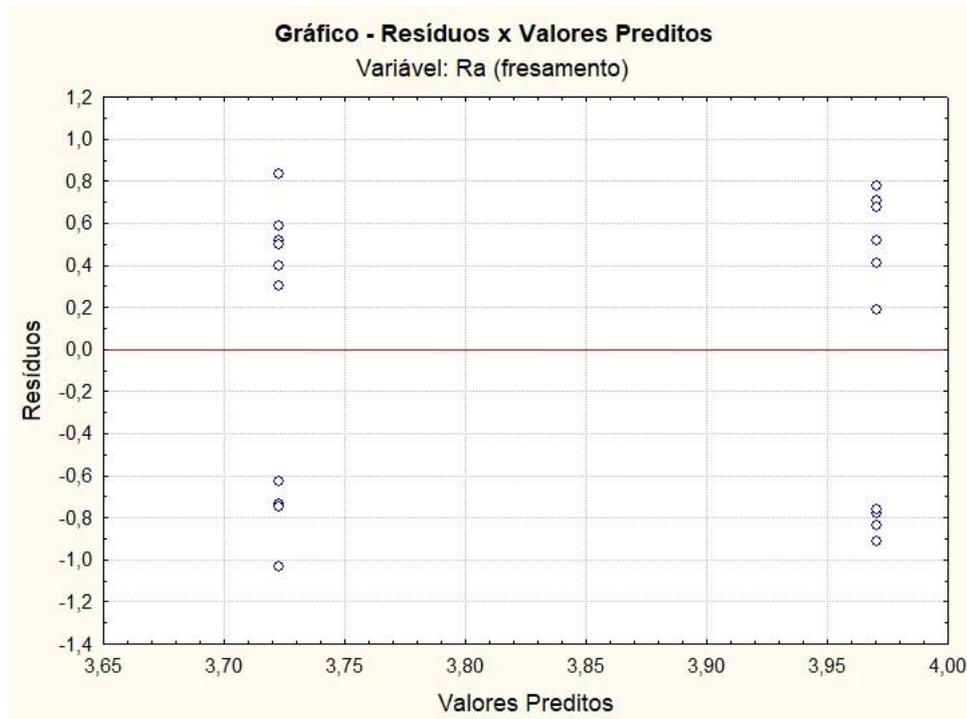
APÊNDICE III – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



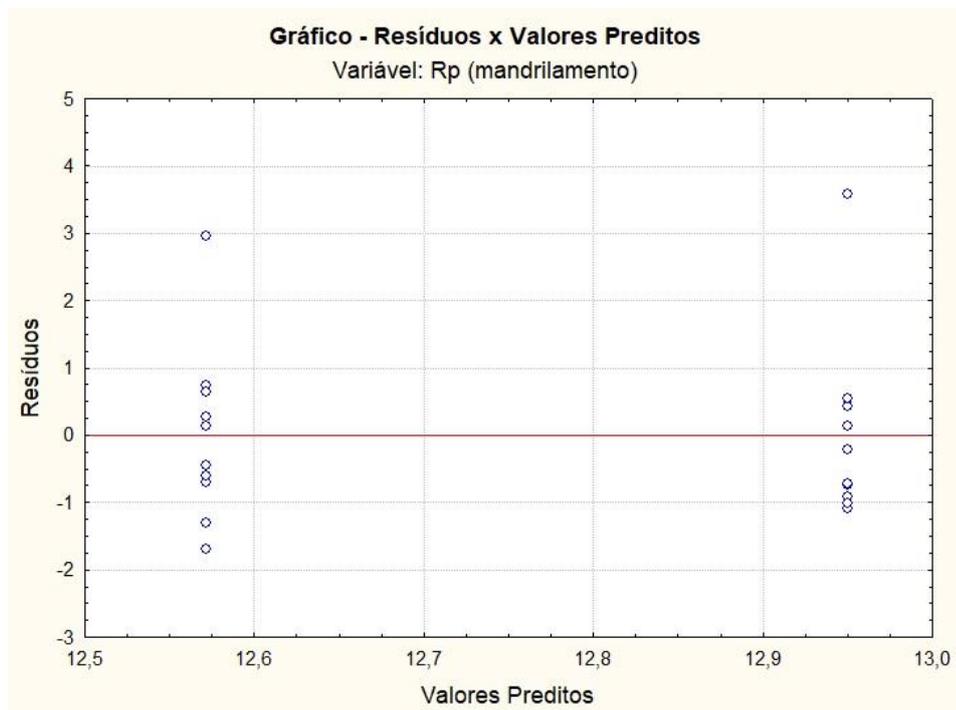
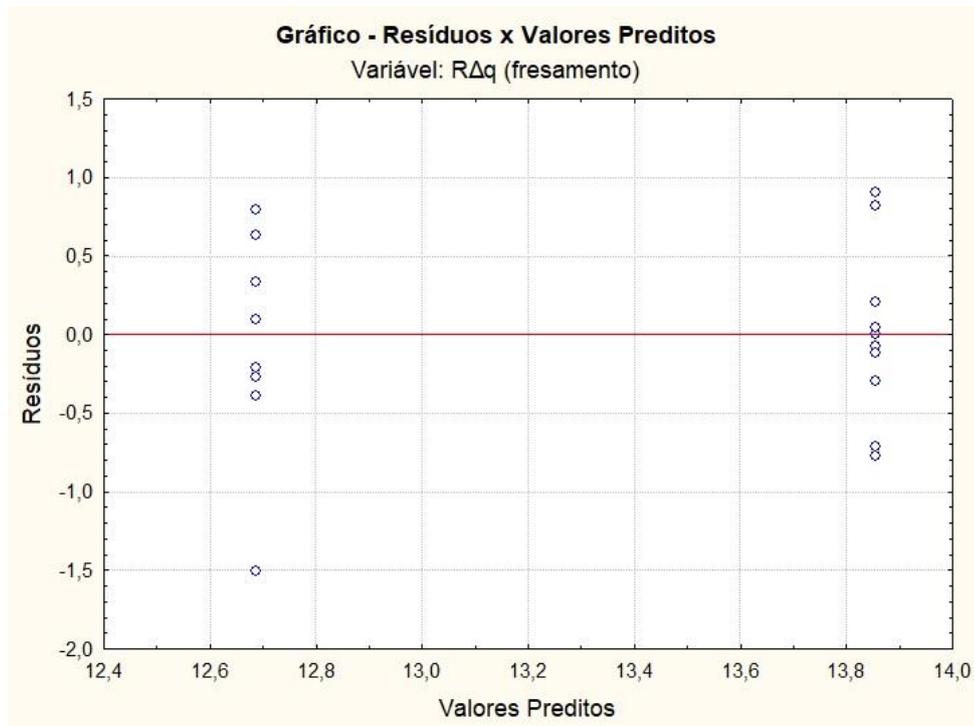
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



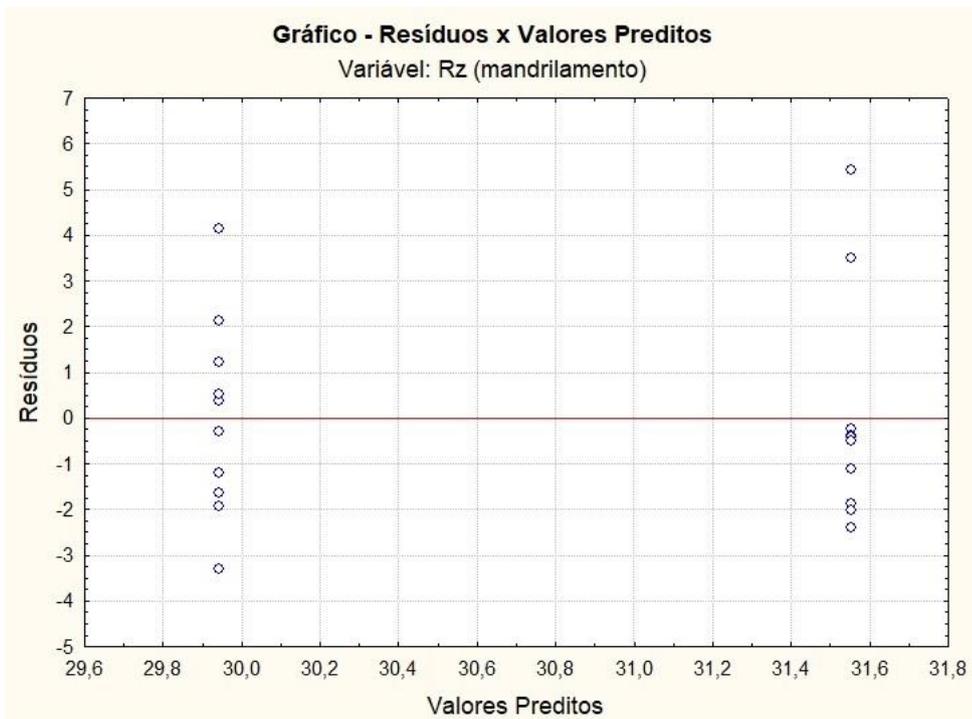
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



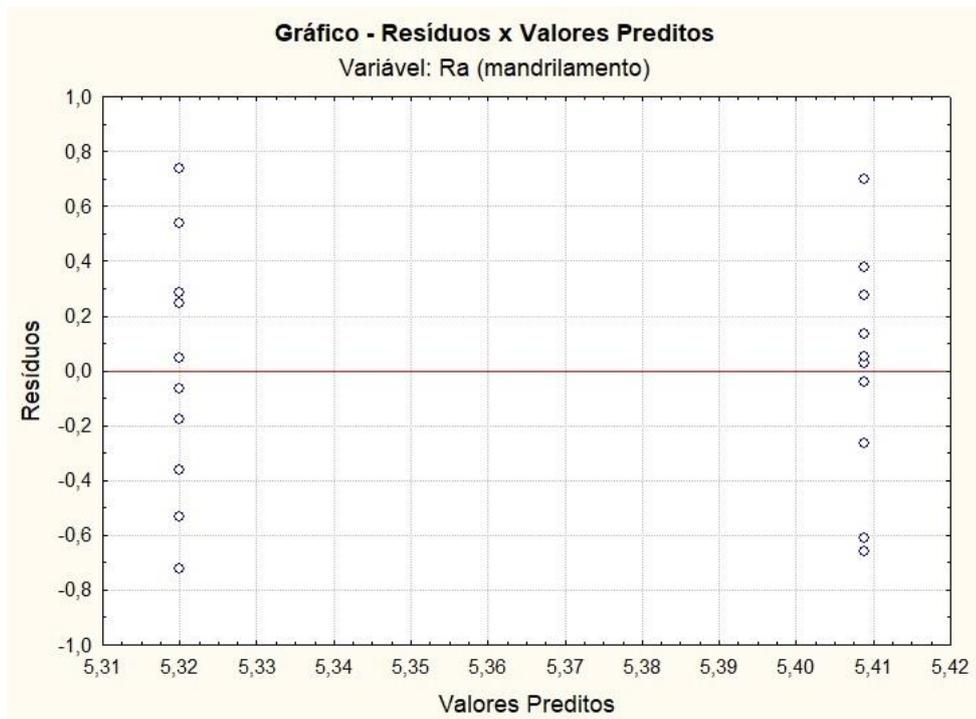
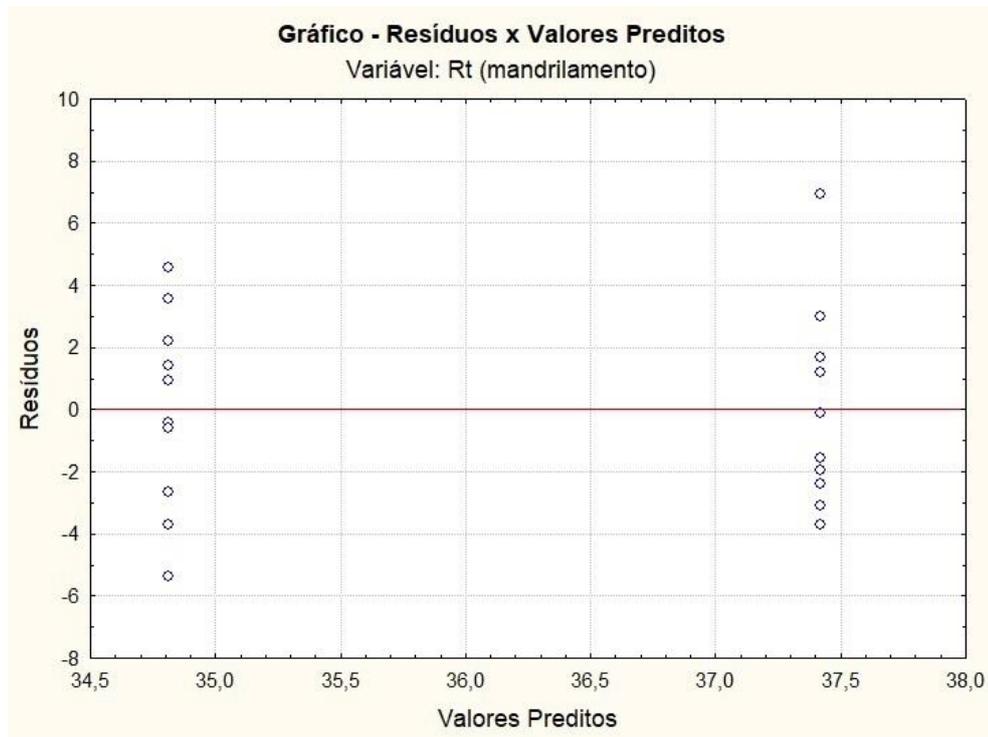
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



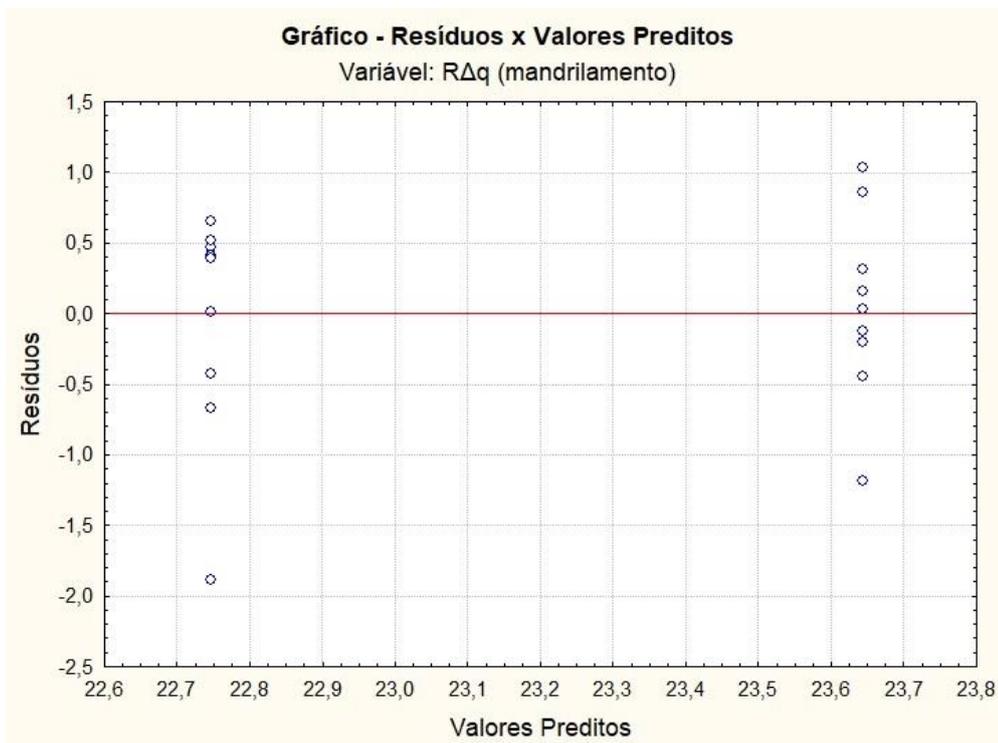
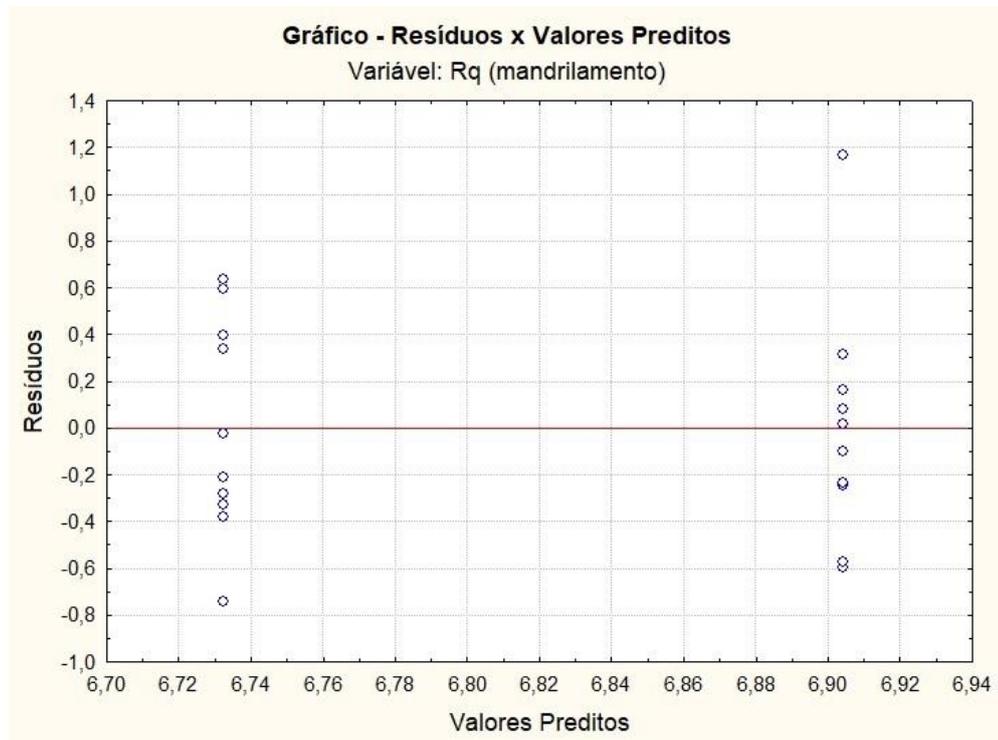
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



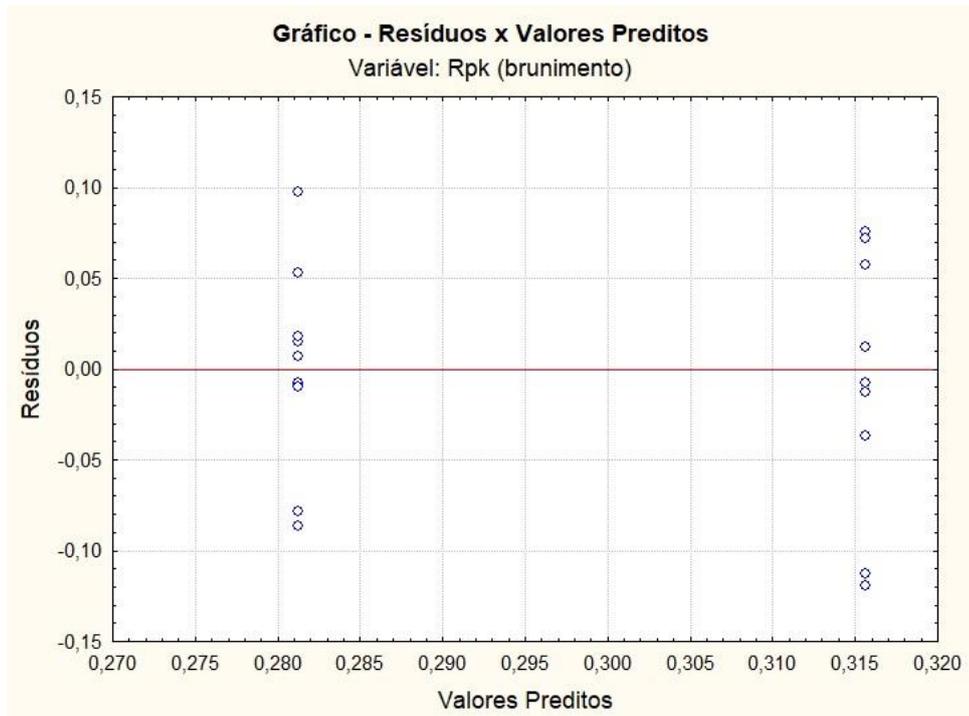
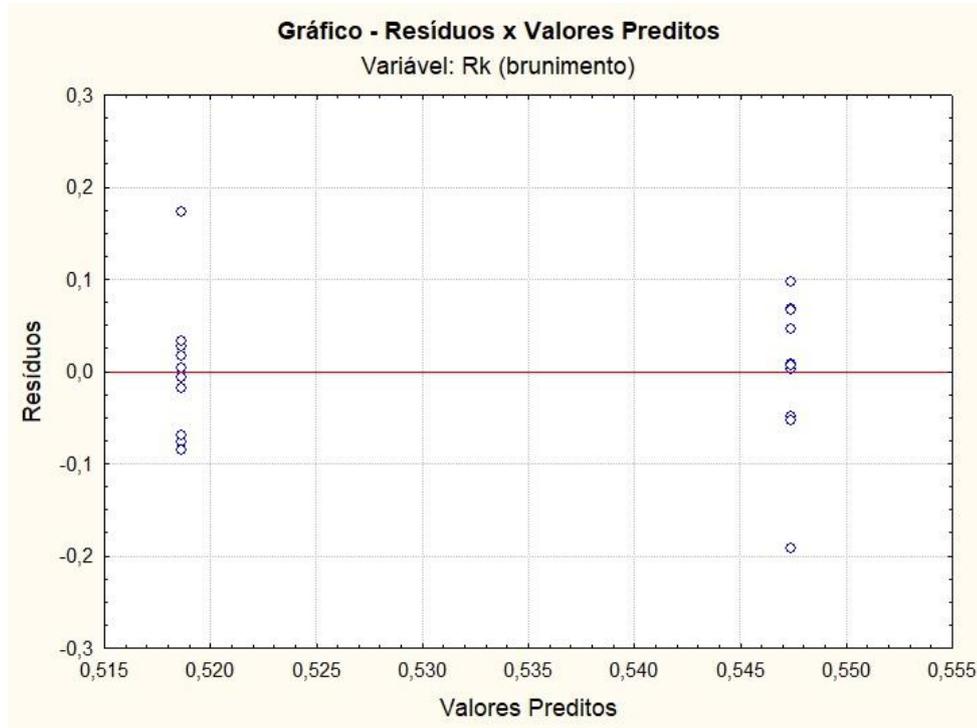
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



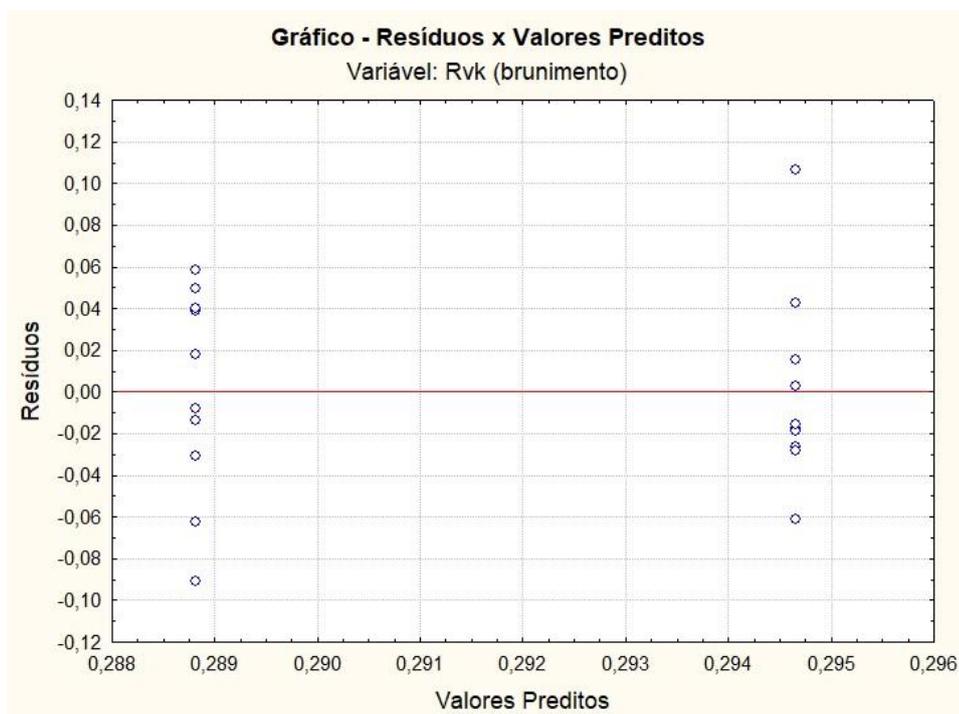
APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



APÊNDICE III (CONTINUAÇÃO) – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DOS VALORES PREDITOS



ANEXO I – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

	Data: 14/08/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

1. Cliente

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

2. Instrumento de medição

Instrumento: Rugosímetro
Tipo: portátil
Fabricante: Taylor Hobson
Resolução: 0,01 μm ou 0,001 μm
Serial: 6317L
Identificação: Patrimônio UFU N.º 14 12 90
Última calibração: 17/03/2016

3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2018
Data do pedido: 13/08/2018
Data da calibração: 14/08/2018

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. (R_a igual a 0,38 μm e R_a igual a 2,94 μm). Em cada uma delas foram efetuadas dez medições utilizando os apalpadores com pontas de raios de 2 μm e 5 μm .

Condições de Medição:

R_a (0,38 μm)

Comprimento de avaliação (l_n) = 0,4 mm

Cut-off (l_r) = 0,08 mm

R_a (2,94 μm)

Comprimento de avaliação (l_n) = 12,5 mm

Cut-off (l_r) = 2,5 mm

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

ANEXO I (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

	Data: 14/08/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

5. Condições ambientais

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

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) - Raio de ponta 2 μm											
L1 [μm]	L2 [μm]	L3 [μm]	L4 [μm]	L5 [μm]	L6 [μm]	L7 [μm]	L8 [μm]	L9 [μm]	L10 [μm]	Média [μm]	Desvio Padrão [μm]
0,388	0,382	0,378	0,390	0,378	0,371	0,377	0,385	0,377	0,385	0,3811	0,0059

Ra (0,38 μm) - Raio de ponta 5 μm											
L1 [μm]	L2 [μm]	L3 [μm]	L4 [μm]	L5 [μm]	L6 [μm]	L7 [μm]	L8 [μm]	L9 [μm]	L10 [μm]	Média [μm]	Desvio Padrão [μm]
0,386	0,389	0,384	0,382	0,392	0,380	0,381	0,380	0,380	0,376	0,3830	0,0048

Ra (2,94 μm) - Raio de ponta 2 μm											
L1 [μm]	L2 [μm]	L3 [μm]	L4 [μm]	L5 [μm]	L6 [μm]	L7 [μm]	L8 [μm]	L9 [μm]	L10 [μm]	Média [μm]	Desvio Padrão [μm]
3,02	3,02	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,04	3,04	3,05	3,033	0,0095

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

ANEXO I (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

	Data: 14/08/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

Ra (2,94 µm) - Raio de ponta 5 µm											
L1 [µm]	L2 [µm]	L3 [µm]	L4 [µm]	L5 [µm]	L6 [µm]	L7 [µm]	L8 [µm]	L9 [µm]	L10 [µm]	Média [µm]	Desvio Padrão [µm]
2,95	2,97	2,96	2,96	2,95	2,96	2,97	2,96	2,96	2,97	2,961	0,0074

8. Incerteza da calibração

Ra = 0,38 µm

Raio da Ponta 2 µm			Raio da Ponta 5 µm		
U [µm]	k	Graus de Liberdade	U [µm]	k	Graus de Liberdade
0,0535	1,96	505	0,1167	1,96	11 448

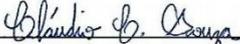
Ra = 2,94 µm

Raio da Ponta 2 µm			Raio da Ponta 5 µm		
U [µm]	k	Graus de Liberdade	U [µm]	k	Graus de Liberdade
0,1731	2,42	6,64	0,1886	2,12	16

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, 14 de agosto de 2018.


 Rosenda Valdés Arencibia
 Gerente Responsável


 Cláudio Costa Souza
 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

ANEXO II – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade



Número do Certificado R4996/13 *Folha* 1 / 2

CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU
ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG
INTERESSADO : O mesmo
ENDEREÇO : O mesmo

INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital
FABRICANTE : Instrutherm
MODELO : HT-260
IDENTIFICAÇÃO : Não especificado
NÚMERO DE SÉRIE : 06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 **LOCAL DA CALIBRAÇÃO:** Laboratório Elus
PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente **TEMPERATURA DO AR :** 23°C ± 5°C
DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 **UMIDADE RELATIVA AR :** 45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :
 Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :
 - A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :

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

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

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

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

ANEXO II (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

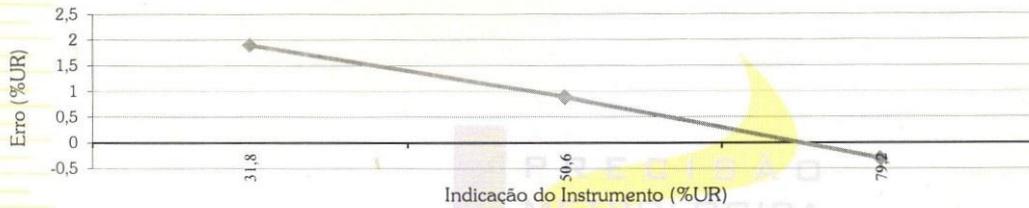
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

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

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

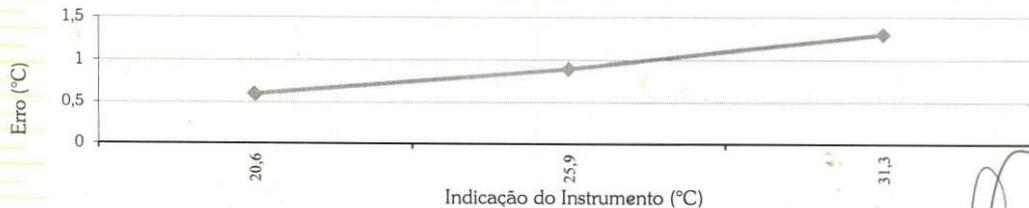
Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

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

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



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