

WALTER DOS SANTOS MOTTA NETO

**COMPARAÇÃO DO EFEITO DO MÉTODO DE
MEDIÇÃO COM CONTATO E SEM CONTATO NA
RUGOSIDADE**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

WALTER DOS SANTOS MOTTA NETO

**COMPARAÇÃO DO EFEITO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO COM
CONTATO E SEM CONTATO NA RUGOSIDADE**

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

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia
Coorientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA - MG

2017

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

M921c Motta Neto, Walter dos Santos, 1991-
2017 Comparação do efeito do método de medição com contato e sem
contato na rugosidade / Walter dos Santos Motta Neto. - 2017.
176 f. : il.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.

Coorientador: Luciano José Arantes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

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

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao apoio e a ajuda de todos que estiveram presentes nessa trajetória de concretização para me tornar mestre e realizar o presente trabalho, destacando-se:

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

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos colegas de pesquisa Marco Tullio Alves, Angélica Palis, Leandro Carvalho e José Eduardo Silveira Leal, por toda a ajuda e disposição em contribuir diretamente na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Márcio Bacci da Silva e Dr. Éder Silva Costa pela assistência e destinação de tempo em participarem desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco pela disponibilidade do interferômetro.

Ao Prof. Dr. Luciano José Arantes pelos ensinamentos e auxílio durante o projeto, e principalmente à Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia pela paciência, aprendizado e orientação de excelente qualidade, colaborando de todas as formas possíveis para que este trabalho fosse realizado com êxito.

Por fim, à minha família querida, por estar presente em todos os momentos da minha vida, bons e ruins, apoiando as minhas escolhas e me incentivando a estar sempre crescendo.

Motta Neto, W. S. **Comparação do efeito do método de medição com contato e sem contato na rugosidade.** 2017. 176 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar o efeito entre os métodos de medição com contato e sem contato da rugosidade nos valores dos parâmetros R_a , R_q , R_v , R_z , R_t , R_p , R_{sk} e R_{ku} , em amostras fabricadas em alumínio comercial, aço carbono SAE 1020 e ferro fundido cinzento, obtidas pelos processos de torneamento e fresamento. Para fabricação das amostras foi proposto um planejamento completo $3 \times 2 \times 2 \times 2$, no qual quatro fatores (material da peça, processo de usinagem, avanço e profundidade de corte) foram considerados. Os parâmetros de rugosidade foram obtidos por meio da medição das amostras utilizando um rugosímetro eletromecânico com pontas de diamante de raio igual a $2 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$. Para efeitos comparativos, as amostras foram medidas por interferometria de luz branca, e os resultados encontrados foram adotados como referência para determinação da diferença entre os valores dos parâmetros de rugosidade fornecidos pelos dois métodos. A incerteza associada à medição de todos os parâmetros avaliados foi estimada aplicando os métodos GUM e de Monte Carlo. Conforme os resultados obtidos os valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_v , R_z , R_t , R_p , R_{sk} e R_{ku} foram influenciados pelo material da peça, pelo processo de usinagem, pelas condições de corte e pelo tipo de medição utilizado. As diferenças percentuais observadas entre os resultados de medição com e sem contato no fresamento do alumínio foram da ordem de 55% para R_a e R_q , já para o R_p , R_v , R_z e R_t esta diferença foi próxima de 75%. No fresamento do ferro fundido cinzento os valores de diferença percentual foram iguais a 70% para o R_a e R_q , e de 80% para os parâmetros R_p , R_v , R_z e R_t .

Palavras Chave: *Rugosidade. Medição com contato. Medição sem contato. Parâmetros de rugosidade. Incerteza de medição.*

Motta Neto, W. S. **Comparison of the effect of contact and non-contact measurement on roughness.** 2017. 176 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

The aim of this work is to compare the effect of contact and non-contact measurement methods of roughness on the values of roughness parameters R_a , R_q , R_v , R_z , R_t , R_p , R_{sk} and R_{ku} in samples made of commercial aluminum, SAE 1020 carbon steel and gray cast iron, obtained by turning and milling processes. A complete factorial $3 \times 2 \times 2 \times 2$ design of experiments was proposed for the fabrication of the samples, in which four factors (sample material, machining process, feed rate and depth of cut) were considered. The roughness parameters were obtained by measuring the samples by means of an electromechanical rugosimeter with diamond tips of radius equal to $2 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$. For comparative purposes, the samples were measured by white light interferometry, and the results found were adopted as reference for determination of the difference between the values of the roughness parameters obtained by the two methods. The uncertainty associated with the measurement of all evaluated parameters was estimated by applying the GUM and Monte Carlo methods. According to the results obtained, the values of the roughness parameters R_a , R_q , R_v , R_z , R_t , R_p , R_{sk} and R_{ku} were influenced by the material, the machining process, the cutting conditions and the type of measurement used. The percentage differences observed between the contact and non-contact measurements in aluminum milling were 55% for R_a and R_q , while for R_p , R_v , R_z and R_t this difference was close to 75%. In milling gray cast iron the percentage difference values were equal to 70% for R_a and R_q , and 80% for the parameters R_p , R_v , R_z and R_t .

Keywords: Roughness. Contact measurement. Non-contact measurement. Parameters of roughness. Measurement uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Irregularidades deixadas pela ferramenta na superfície da peça (TAYLOR HOBSON, 2003).....	2
Figura 1.2 - Influência das dimensões da ponta do apalpador na obtenção do perfil de rugosidade (BHUSHAN, 2002)	4
Figura 2.1 - Tipos de superfície: geométrica, real e efetiva (ABNT, 2002).....	7
Figura 2.2 - Composição da superfície (ABNT, 2002)	7
Figura 2.3 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994).....	8
Figura 2.4 - Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).....	10
Figura 2.5 - Altura máxima dos picos do perfil (ABNT, 2002)	12
Figura 2.6 - Profundidade máxima do vale do perfil (ABNT, 2002)	12
Figura 2.7 - Altura máxima do perfil (ABNT, 2002)	13
Figura 2.8 - Perfis de rugosidade com o mesmo valor de Rz (LEACH, 2001)	13
Figura 2.9 - Representação do Ra para perfis diferentes (TAYLOR HOBSON, 2003).....	14
Figura 2.10 - Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)	15
Figura 2.11 - Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)	16
Figura 2.12 - Rugosímetro eletromecânico digital (TAYLOR HOBSON, 2003).....	17
Figura 2.13 - Visualização da ponta de diamante de um rugosímetro com sapata.	17
Figura 2.14 - Perfil efetivo de rugosidade de uma amostra de alumínio (DOBES, 2014)	18
Figura 2.15 - Influência das dimensões da ponta do apalpador na obtenção do perfil de rugosidade (TAYLOR HOBSON, 2003).....	19
Figura 2.16 - Deformação de uma amostra de alumínio torneada, observada no MEV, após a medição de rugosidade por meio de um rugosímetro eletromecânico, com ponta de diamante com raio de 2 μm (DOBES et al., 2017).....	21

Figura 2.17 - Geometria cônica e ponta esférica do apalpador com diferentes valores de raio e ângulo de cone (MITUTOYO, 2016)	21
Figura 2.18 - Efeito da direção de apalpação no perfil efetivo da rugosidade (LEACH, 2001).	22
Figura 2.19 - Valores médios de rugosidade obtidos em cilindros de compressores herméticos usinados pelo brunitimento convencional (CH) e brunitimento convencional mais o flexível (C+FH) durante a medição com contato (2D) e sem contato (3D) (ARANTES et al., 2017)	24
Figura 2.20 - Representação esquemática do torneamento de faceamento e torneamento curvilíneo (FERRARESI, 1970)	25
Figura 2.21 - Esquema representativo do processo de fresamento frontal	27
Figura 2.22 - Esquema representativo do processo de torneamento de faceamento	27
Figura 2.23 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989)	28
Figura 2.24 - Topografias superficiais de amostras torneadas de aço carbono (a) e alumínio (b) e amostra fresada de ferro fundido cinzento (c) (DAVIM, 2010).	29
Figura 2.25 - Representação de uma distribuição normal (CAIRE, 2013).	37
Figura 2.26 - Distribuição retangular (BIPM et al., 2008).	38
Figura 2.27 - Distribuição trapezoidal (BIPM et al., 2008).....	38
Figura 2.28 - Distribuição triangular (BIPM et al., 2008).....	39
Figura 2.29 - Resumo das etapas para aplicação do método de MC (BIPM et al., 2008).....	42
Figura 3.1 - Ferramenta de corte para o torneamento: pastilha quadrada de metal duro ISO SPUN 12 03 08 H1P e suporte para facear a 75° modelo CSKPR 2525 M12.....	46
Figura 3.2 - Ferramenta de corte para o fresamento: fresa Sandvik R290 - 063QZ2 - 12M de diâmetro igual a 63 mm, com cinco pastilhas quadradas de metal duro CoroMill 290 M.....	47
Figura 3.3 - Amostras de alumínio resultantes dos processos de torneamento (amostra 1) e fresamento (amostra 5).	48
Figura 3.4 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson.	49
Figura 3.5 - Apalpadores de ponta com raio igual a 2 μm e 5 μm	49
Figura 3.6 - Interface gráfica do programa computacional <i>Talyprofile Gold 4.0</i>	50
Figura 3.7 - Interface gráfica do programa <i>Talysurf CLI 2000</i>	52
Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro R_a para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	60

Figura 4.2 - Valores médios do parâmetro R_a para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	60
Figura 4.3 - Topografias superficiais de amostras torneadas de Al na condição E1 (a) e E2 (b) em 3D.....	61
Figura 4.4 - Topografias superficiais de amostras torneadas de FF na condição E1 (a) e E2 (b) em 3D.	62
Figura 4.5 - Topografias superficiais das amostras fresadas de Al (a), FF (b) e AC (c) na condição E1 em 3D.	64
Figura 4.6 - Diferença associada à medição do R_a para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.	66
Figura 4.7 - Diferença associada à medição do R_a para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	67
Figura 4.8 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_a para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	68
Figura 4.9 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_a para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	69
Figura 4.10 - Valores médios do parâmetro Rq para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	72
Figura 4.11 - Valores médios do parâmetro Rq para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	73
Figura 4.12 - Diferença associada à medição do Rq para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	74
Figura 4.13 - Diferença associada à medição do Rq para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	75
Figura 4.14 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rq para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	76
Figura 4.15 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rq para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	76
Figura 4.16 - Valores médios do parâmetro Rp para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	79
Figura 4.17 - Valores médios do parâmetro Rp para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	79

Figura 4.18 - Diferença associada à medição do R_p para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	81
Figura 4.19 - Diferença associada à medição do R_p para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	82
Figura 4.20 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_p para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	83
Figura 4.21 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_p para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	83
Figura 4.22 - Perfis efetivos referentes à amostra torneada de Al na condição E1 para a medição sem contato (a) e medição com contato (b).....	86
Figura 4.23 - Valores médios do parâmetro R_v para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	87
Figura 4.24 - Valores médios do parâmetro R_v para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	87
Figura 4.25 - Diferença associada à medição do R_v para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	88
Figura 4.26 - Diferença associada à medição do R_v para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	89
Figura 4.27 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_v para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	90
Figura 4.28 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_v para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	91
Figura 4.29 - Valores médios do parâmetro R_z para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	94
Figura 4.30 - Valores médios do parâmetro R_z para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	94
Figura 4.31 - Diferença associada à medição do R_z para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	96
Figura 4.32 - Diferença associada à medição do R_z para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	97
Figura 4.33 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_z para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	98

Figura 4.34 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rz para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	98
Figura 4.35 - Valores médios do parâmetro Rt para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	101
Figura 4.36 - Valores médios do parâmetro Rt para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	101
Figura 4.37 - Diferença associada à medição do Rt para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	103
Figura 4.38 - Diferença associada à medição do Rt para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	104
Figura 4.39 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rt para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	105
Figura 4.40 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rt para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	105
Figura 4.41 - Valores médios do parâmetro Rsk para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	108
Figura 4.42 - Valores médios do parâmetro Rsk para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	109
Figura 4.43 - Diferença associada à medição do Rsk para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	110
Figura 4.44 - Diferença associada à medição do Rsk para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	111
Figura 4.45 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rsk para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	112
Figura 4.46 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rsk para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	113
Figura 4.47 - Valores médios do parâmetro Rku para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	116
Figura 4.48 - Valores médios do parâmetro Rku para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).....	117
Figura 4.49 - Diferença associada à medição do Rku para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	118

Figura 4.50 - Diferença associada à medição do <i>Rku</i> para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	119
Figura 4.51 - Diferença percentual na medição sem e com contato do <i>Rku</i> para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	120
Figura 4.52 - Diferença percentual na medição sem e com contato do <i>Rku</i> para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.....	121
Figura 4.53 - Valores de diferença percentual para o torneamento.....	125
Figura 4.54 - Valores de diferença percentual para o fresamento.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comprimentos de amostragem (ABNT, 2008)	9
Tabela 2.2 - Parâmetros usados para avaliar a rugosidade (ABNT, 2002).	11
Tabela 2.3 - Curvas e parâmetros relacionados (ABNT, 2002).	11
Tabela 2.4 - Efeito dos tipos de filtro nas análises de textura (OLIVEIRA, 2004).....	23
Tabela 2.5 - Quadro de ANOVA.....	33
Tabela 3.1 - Matriz de planejamento fatorial completo 3x2x2x2.....	45
Tabela 3.2 - Dados adotados relacionados à avaliação da incerteza de medição com contato das amostras associada aos parâmetros R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t	54
Tabela 3.3 - Dados adotados relacionados à avaliação da incerteza de medição sem contato das amostras associada aos parâmetros R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t	55
Tabela 3.4 - Funções utilizadas para a simulação do MC (EXCEL, 2007).....	57
Tabela 4.1 - ANOVA do parâmetro R_a de rugosidade para as amostras torneadas.....	70
Tabela 4.2 - ANOVA do parâmetro R_a de rugosidade para as amostras fresadas.....	71
Tabela 4.3 - ANOVA do parâmetro R_q de rugosidade para as amostras torneadas.....	77
Tabela 4.4 - ANOVA do parâmetro R_q de rugosidade para as amostras fresadas.....	78
Tabela 4.5 - ANOVA do parâmetro R_p de rugosidade para as amostras torneadas.....	84
Tabela 4.6 - ANOVA do parâmetro R_p de rugosidade para as amostras fresadas.....	85
Tabela 4.7 - ANOVA do parâmetro R_v de rugosidade para as amostras torneadas.....	92
Tabela 4.8 - ANOVA do parâmetro R_v de rugosidade para as amostras fresadas.....	93
Tabela 4.9 - ANOVA do parâmetro R_z de rugosidade para as amostras torneadas.....	99
Tabela 4.10 - ANOVA do parâmetro R_z de rugosidade para as amostras fresadas.....	100
Tabela 4.11 - ANOVA do parâmetro R_t de rugosidade para as amostras torneadas.....	106
Tabela 4.12 - ANOVA do parâmetro R_t de rugosidade para as amostras fresadas.....	107
Tabela 4.13 - ANOVA do parâmetro R_{sk} de rugosidade para as amostras torneadas.	114
Tabela 4.14 - ANOVA do parâmetro R_{sk} de rugosidade para as amostras fresadas.....	115
Tabela 4.15 - ANOVA do parâmetro R_{ku} de rugosidade para as amostras torneadas.	122

Tabela 4.16 - ANOVA do parâmetro Rku de rugosidade para as amostras fresadas. 123

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- a*: Metade do comprimento da base de um retângulo ou de um triângulo
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al: alumínio comercial
ANOVA: Análise de Variância
ap: profundidade de corte em mm
ASME: *American Society of Mechanical Engineers*
BIPM: Bureau International de Pesos e Medidas
CH: brunimento convencional
C+FH: brunimento convencional mais o flexível
CIPM: Comitê Internacional de Pesos e Medidas
c_i: coeficiente de sensibilidade
CNC: Controle Numérico Computadorizado
CS: coeficiente de sensibilidade
D: deformação do material
DOE: *Design of Experiment*
DP: tipo de distribuição de probabilidade
E1: condição de corte associada ao experimento 1
E2: condição de corte associada ao experimento 2
E3: condição de corte associada ao experimento 3
E4: condição de corte associada ao experimento 4
f: avanço em mm/rot
F: fresamento de topo
FDP: função densidade de probabilidade
FF: ferro fundido cinzento
FV: fonte de variação
F-valor: razão entre QM

GL: grau de liberdade

GUM: Guia para a Expressão da Incerteza de Medição

HB: dureza Brinell

H_0 : hipótese nula

H_1 : hipótese alternativa

ISO: *International Organization for Standardization*

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

k : fator de abrangência

L_e : comprimento de amostragem em mm

LEPU: Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem

L_m : percurso de medição em mm

LMD: Laboratório de Metrologia Dimensional

L_n : percurso final em mm

L_t : percurso total em mm

L_v : percurso inicial em mm

M : número de iterações

MC: Monte Carlo

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

n : número de elementos da amostra

N : quantidade de variáveis de entrada

p : probabilidade

P_{Rug} : parâmetro de rugosidade medido

p -valor: probabilidade de significância

QM: quadrado médio

R_a : desvio aritmético médio do perfil avaliado em μm

R_c : altura média dos elementos do perfil em μm

R_{INT} : resolução do interferômetro em μm

R_{ku} : fator de achataamento do perfil avaliado (*kurtosis*)

$Rmr(c)$: razão material do perfil em μm

Rmr : razão portante relativa em μm

R_p : altura máxima do pico do perfil em μm

Rpk : Região de pico em μm

Rq : desvio médio quadrático do perfil avaliado em μm

- R_{Rug} : resolução do rugosímetro em μm
- Rsk : fator de assimetria do perfil avaliado (*skewness*)
- RSm : largura média dos elementos do perfil em μm
- Rt : altura total do perfil em μm
- Rv : profundidade máxima do vale do perfil em μm
- Rz : altura máxima do perfil em μm
- $R\Delta q$: inclinação quadrática media do perfil avaliado em μm
- $R\delta c$: diferença de altura na seção do perfil em μm
- s : desvio padrão experimental em μm
- Sa : nomenclatura de Ra quando em 3D em μm
- SAE: *Society of Automotive Engineers*
- Spk : nomenclatura de Rpk quando em 3D
- SQ: soma de quadrado
- T: torneamento de faceamento
- TA: tipo de avaliação da incerteza
- TM: tipo de medição utilizada
- $u(x)$: Incerteza padrão da variável x
- $U(x)$: Incerteza expandida da variável x
- $u_c(x)$: Incerteza padrão combinada da variável x
- $U(IC_{INT})$: incerteza associada à calibração do interferômetro
- $U(IC_{Rug})$: incerteza associada à calibração do rugosímetro
- UFU: Universidade Federal de Uberlândia
- $v_{efetivo}$: Grau de liberdade efetivo
- VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia
- x_i : estimativa de X_i
- X_i : variável de entrada
- \bar{x} : Média aritmética
- $\bar{x}(L_{INT})$: média aritmética dos valores indicados pelo interferômetro em μm
- $\bar{x}(L_{Rku})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rku
- $\bar{x}(L_{Rsk})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro para o parâmetro Rsk
- $\bar{x}(L_{Rug})$: média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro em μm
- Y : mensurando ou variável de saída
- \bar{y} : estimativa de Y

Z_p : altura do pico do perfil em μm

Z_v : profundidade do vale do perfil em μm

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

α : nível de significância

β : metade do comprimento da base menor de um trapézio

ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador

ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição

$\Delta I C_{INT}$: correção associada à incerteza de calibração do interferômetro

$\Delta I C_{Rug}$: correção associada à incerteza de calibração do rugosímetro

ΔR_{INT} : correção associada à resolução do interferômetro

ΔR_q : correção associada à incerteza de medição do parâmetro Rq

ΔR_{Rug} : correção associada à resolução do rugosímetro

ΔZ : correção associada à incerteza de medição da ordenada Z

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Rugosidade	6
2.1.1 Parâmetros de Rugosidade abordados.....	12
2.1.2 Métodos de Medição de Rugosidade	16
2.1.3 Instrumento de medição rugosímetro	16
2.1.4 Medição com contato da rugosidade	17
2.1.5 Fontes de erro na medição com contato da rugosidade	19
2.1.5.1 <i>Dimensões e geometria da ponta do apalpador</i>	19
2.1.5.2 <i>Força de medição</i>	20
2.1.5.3 <i>Direção de apalpamento</i>	22
2.1.5.4 <i>Vibração mecânica</i>	22
2.1.5.5 <i>Características dos filtros</i>	23
2.2. Fundamentos Básicos de Usinagem.....	24
2.2.1 Torneamento e fresamento	25
2.2.2 Parâmetros de corte	26
2.2.3 Integridade Superficial na Usinagem	28
2.2.4 Considerações ao Material da Peça	29
2.2.4.1 <i>Usinagem do Aço</i>	30
2.2.4.2 <i>Usinagem do Ferro Fundido Cinzento</i>	30
2.2.4.3 <i>Usinagem do Alumínio</i>	31
2.3 Planejamento de Experimentos.....	31
2.4 Incerteza de Medição	34
2.4.1 Método proposto no GUM	35
2.4.2 Método de Monte Carlo (MC)	40

CAPÍTULO III - METODOLOGIA	44
3.1. Planejamento experimental	44
3.2. Fabricação das amostras	46
3.3. Medição da rugosidade	48
3.4. Avaliação da incerteza de medição	52
3.4.1 Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rv, Rp, Rz e Rt na medição com contato	53
3.4.2. Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rv, Rp, Rz e Rt na medição sem contato	55
3.4.3. Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Rsk e Rku	56
3.5. Análise estatística.....	58
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Medição com contato utilizando diferentes raios de ponta	59
4.2 Medição com contato e sem com contato dos parâmetros de rugosidade	59
4.2.1 Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade (<i>Ra</i>)	60
4.2.2 Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade (<i>Rq</i>)	72
4.2.3 Altura máxima do pico do perfil de rugosidade (<i>Rp</i>).....	79
4.2.4 Profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade (<i>Rv</i>).....	86
4.2.5 Altura máxima do perfil de rugosidade (<i>Rz</i>)	94
4.2.6 Altura total do perfil de rugosidade (<i>Rt</i>)	101
4.2.7 Fator de assimetria do perfil de rugosidade (<i>Rsk</i>).....	108
4.2.8 Fator de achatamento do perfil de rugosidade (<i>Rku</i>)	116
4.3 Análise Final	124
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .	127
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE	135
APÊNDICE I - Valores Médios Obtidos na Medição com Contato por meio da Utilização de Pontas com Raios Distintos	135

APÊNDICE II - Quadro ANOVA Completo dos Parâmetros de Rugosidade	144
ANEXOS	147
ANEXO I - Certificado de Calibração do Rugosímetro	147
ANEXO II - Certificado de Calibração do Desempeno de Granito	150
ANEXO III - Certificado de Calibração do Termo-higrômetro Digital	152
ANEXO IV - Certificado de Calibração do Interferômetro	154

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Toda operação realizada pelos processos de fabricação mecânica tem como objetivo principal produzir componentes intercambiáveis com o máximo de funcionalidade a custo conveniente. O sistema de peças intercambiáveis, bem interpretado, aumenta a qualidade dos produtos e reduz os custos (AGOSTINHO et al., 1977). Porém, a dificuldade, ou até mesmo a impossibilidade, de se obter peças perfeitas, dimensional e geometricamente, criou a necessidade de quantificar e indicar, nos desenhos das mesmas, as tolerâncias dimensionais e geométricas e, consequentemente, desenvolver meios para verificá-las. Isto somado à contínua diminuição dos valores numéricos das tolerâncias dimensionais e geométricas, além das exigências funcionais cada vez maiores, têm levado os projetistas a utilizarem e aplicarem com maior intensidade os conceitos e normas técnicas associados.

As tolerâncias geométricas se dividem em dois grupos, a saber: tolerâncias macrogeométricas e microgeométricas, e estas são aplicadas para limitar os desvios macro e microgeométricos.

Entre os desvios macrogeométricos incluem-se divergências de ondulações e os desvios de retitude, planeza, circularidade, dentre outros. Já os desvios microgeométricos são conhecidos como rugosidade, sendo esta uma característica que afeta e define o modo como as superfícies irão trabalhar e interagir (MARCO FILHO, 1996). Neste trabalho, serão abordadas as tolerâncias microgeométricas.

Agostinho et al. (1977) definem rugosidade como a soma das diferenças de forma de 3^a a 5^a ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem. Diferenças de forma de 3^a a 5^a ordens são diferenças que se repetem, regular ou irregularmente, cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade. Destaca-se, porém, que a rugosidade não é apenas

inerente ao processo de usinagem, mas também pode caracterizar as superfícies das peças obtidas por todos os processos de fabricação como estampagem, laminação, soldagem, fundição etc.

Para o processo de usinagem em particular, a rugosidade está relacionada com a geometria da ferramenta que atacou a superfície durante a fabricação. A Fig. 1.1 apresenta um conjunto de irregularidades causado pela ferramenta de corte durante o processo de fabricação na superfície de uma peça.

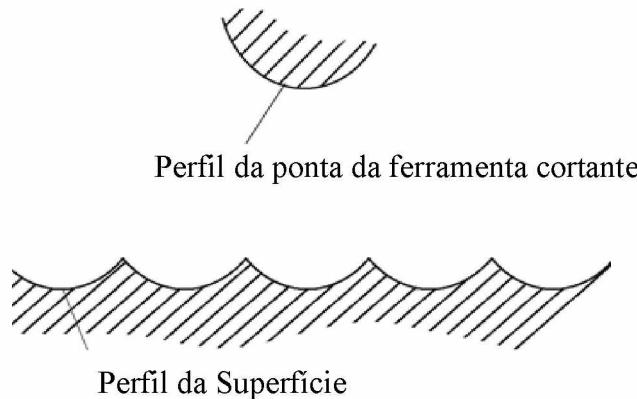


Figura 1.1 – Microirregularidades deixadas pela ferramenta na superfície da peça (TAYLOR HOBSON, 2003).

A partir da Fig. 1.1, pode-se acrescentar que os parâmetros de corte estabelecidos durante a usinagem, principalmente o avanço, influenciam a rugosidade final da peça.

A importância do estudo da rugosidade aumenta à medida que cresce a precisão do ajuste entre as peças a serem acopladas. É fundamental ainda quando somente as tolerâncias dimensionais e macrogeométricas não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado (AGOSTINHO et al., 1977).

A rugosidade desempenha um papel primordial no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e também na aparência. Se for considerado o deslizamento entre as superfícies, uma especificação de rugosidade inadequada pode causar desgaste excessivo, vibração mecânica, maior consumo de energia e, consequentemente, maior custo (MARCO FILHO, 1996).

A qualidade do acabamento superficial das peças fabricadas é avaliada por meio da medição da rugosidade. Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis de rugosidade

amostrais de superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação.

A medição da rugosidade requer o uso de equipamentos especificamente desenvolvidos para esse fim, sendo que a medição pode ser efetuada com contato ou sem contato. A medição da rugosidade é geralmente efetuada usando métodos de medição com contato (CHAND et al., 2011; BUHSHAN, 2000; LEACH, 2001). Neste caso, um apalpador entra em contato físico com a superfície a ser medida e um transdutor piezoelétrico ou indutivo converte o movimento vertical, em um sinal elétrico (LEACH, 2001). A ponta do apalpador é fabricada de diamante sintético, por ser um material duro e resistente, e a geometria da mesma pode ser cone-esférica ou tipo pirâmide truncada.

A preferência pela medição com contato está dada principalmente pelo menor custo relativo frente as técnicas sem contato do rugosímetro e pela sua portabilidade.

As limitações deste método de medição podem ser resumidas em: impossibilidade de obter o perfil real devido às dimensões da ponta do apalpador, porque o raio de curvatura dos picos pode ser aumentado e os vales podem não ser detectados (POON, BSHUHAN, 1995); uma ponta de apalpador fina, mesmo sob cargas baixas pode resultar em uma área de contato pequena onde a pressão local pode ser alta o suficiente para causar a deformação elástica e plástica da superfície da peça (CHAND et al., 2011; VORBURGER et al., 2007); e quando a superfície objeto de medição tem uma geometria essencialmente não plana, por exemplo cilíndrica, esférica, hiperbólica ou de forma livre, pode-se perder o contato entre a ponta do apalpador e a superfície da peça avaliada, principalmente nos apalpadores com sapata.

Dentre as fontes de erros, uma atenção especial deve ser dada à geometria e às dimensões da ponta do apalpador, uma vez que elas interferem diretamente no perfil efetivo da rugosidade, a partir do qual são determinados os valores dos parâmetros e as curvas usados para caracterizar a rugosidade de uma determinada superfície.

O efeito das dimensões da ponta do apalpador no perfil de rugosidade efetivo é evidenciado na Fig. 1.2. Neste caso uma superfície é apalpada por meio de dois apalpadores A e B, sendo que o apalpador B possui uma ponta com raio maior que o apalpador A. Observa-se nesta figura que na medida em que a ponta do apalpador tiver um maior raio, o perfil efetivo dista mais do perfil real da peça, e com isto os erros de medição são maiores.

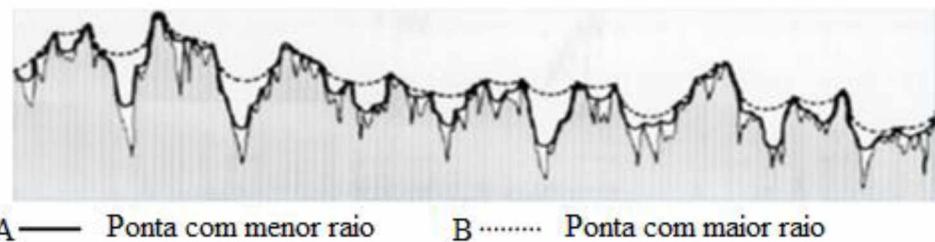


Figura 1.2 - Influência das dimensões da ponta do apalpador na obtenção do perfil de rugosidade (BHUSHAN, 2000).

Além disso, em função da combinação da geometria da ponta do apalpador e da força exercida durante a medição, existe uma pequena área de contato entre apalpador e peça de modo que a pressão local pode ser suficientemente elevada para provocar deformação elástica e plástica significativa da superfície medida.

De acordo com Leach (2001), a deformação plástica da superfície depende da ponta do apalpador, do material da peça objeto de medição e da força aplicada durante a medição. O valor de 20 nm pode ser adotado para superfícies metálicas medida com um apalpador com ponta de 2 μm e força de medição de 0,75 mN.

Considerando que a resolução dos rugosímetros eletromecânicos é geralmente igual a 0,01 μm e 0,001 μm pode-se inferir que o efeito da deformação do material é significativo no resultado da medição da rugosidade.

De forma geral, as fontes de erro presentes na medição da rugosidade são amplamente comentadas na literatura, entretanto poucos trabalhos são encontrados abordando este assunto. Ainda, não foi encontrada na literatura técnica uma orientação para os usuários dos rugosímetros quanto qual a dimensão da ponta do apalpador mais adequada para uma determinada aplicação.

De acordo com Song et al. (2014) a dimensão da ponta do apalpador altera os valores de quase todos os parâmetros de rugosidade constituindo um dos principais contribuintes para o erro de medição. Mesmo assim, a correção de tal efeito não é muito comum em laboratórios metrológicos.

No contexto descrito, surgiu a proposta deste trabalho que tem os seguintes objetivos.

Objetivo principal:

Comparar o efeito do método de medição com contato e sem contato da rugosidade nos valores dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_v , R_p , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}), frequentemente

usados na indústria durante o controle geométrico das peças usinadas. Para tanto foram fabricadas amostras de diferentes materiais (alumínio comercial, ferro fundido cinzento e aço com baixo teor carbono SAE 1020) pelos processos de torneamento de faceamento e fresamento de topo, usando diferentes regimes de corte.

Objetivos secundários:

- avaliar os erros presentes nas medições efetuadas com o rugosímetro eletromecânico;
- avaliar a incerteza associada às medições, de forma a contribuir para a rastreabilidade dos resultados das mesmas;
- criar orientações para os usuários dos rugosímetros eletromecânicos sobre qual método de medição deve ser utilizado em função da aplicação.

Esta dissertação conta com mais quatro capítulos, os quais são descritos a seguir.

O capítulo II apresenta a revisão bibliográfica necessária para o entendimento sobre o tema rugosidade, quer sejam os principais conceitos relacionados, os sistemas e métodos de medição, bem como as principais fontes de erro associadas. É apresentada ainda uma breve descrição dos processos de usinagem e dos materiais utilizados; a teoria básica sobre planejamento de experimentos e os métodos GUM e Monte Carlo, utilizados para a avaliação da incerteza de medição.

O capítulo III, por sua vez, detalha os matérias e métodos utilizados para alcançar o objetivo proposto. O mesmo foi dividido em cinco etapas: planejamento experimental, fabricação das amostras, medição da rugosidade, avaliação da incerteza de medição e análise estatística.

O capítulo IV mostra os resultados obtidos, bem como as análises e discussões.

Por sua vez, o capítulo V apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais conceitos e parâmetros relacionados ao tema rugosidade, bem como os sistemas de medição, os métodos de medição e as fontes de erro relacionadas à medição desta grandeza. Ainda, são apresentadas algumas definições referentes ao tema usinagem, assim como os fundamentos teóricos sobre planejamento de experimentos e incerteza de medição.

2.1 Rugosidade

As superfícies geradas nos processos de fabricação não são superfícies perfeitas quanto a dimensões e geometria, existem desvios que só podem ser observados quando estas são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. Quando analisadas com recursos apropriados, estas superfícies apresentam irregularidades, compostas pelos desvios macrogeométricos e microgeométricos (OLIVEIRA, 2004).

Para efeito de estudo do acabamento superficial, a ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) classifica as superfícies como geométrica, real e efetiva (Fig. 2.1). A primeira trata-se de uma superfície ideal prescrita no projeto, onde não existem desvios de forma macro e microgeométricos. Já a segunda refere-se a uma superfície que resulta do método empregado na fabricação da peça. E, por fim, uma superfície efetiva é aquela obtida durante a medição, com forma aproximada da real, a qual poderá ser diferente quando aplicados diferentes sistemas de medição.

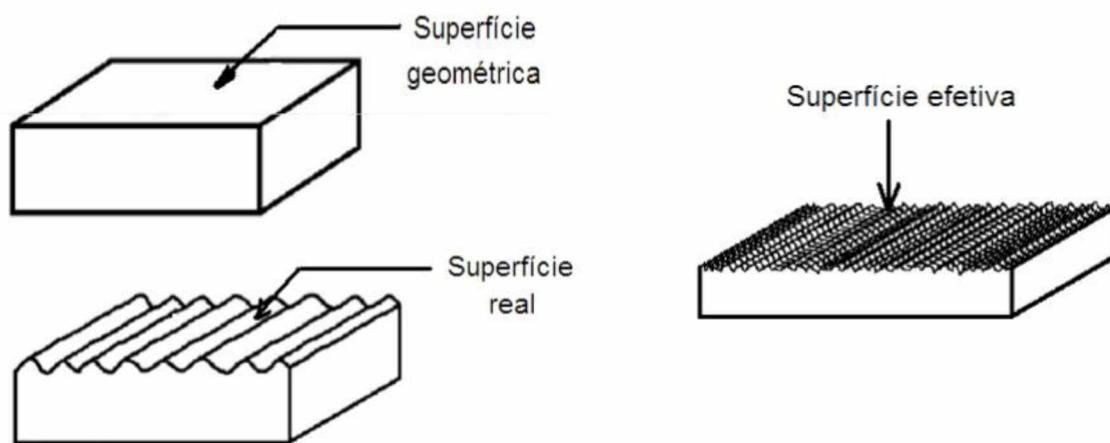


Figura 2.1 – Tipos de superfície: geométrica, real e efetiva (ABNT, 2002).

A medição da rugosidade de uma superfície não é uma tarefa trivial. Isto ocorre porque os desvios macrogeométricos, as ondulações e a própria rugosidade (desvio microgeométrico) apresentam-se superpostos na superfície real da peça, conforme indicado na Fig. 2.2. Os sinais elétricos de rugosidade apresentam altas frequências e baixas amplitudes de onda quando comparados com os desvios macrogeométricos e as ondulações, caracterizados por pequenas frequências e grandes amplitudes. Portanto, durante a medição da rugosidade, devem-se aplicar filtros que permitam separar ou atenuar sinais com frequências inferiores, isto é, filtros passa-alta.

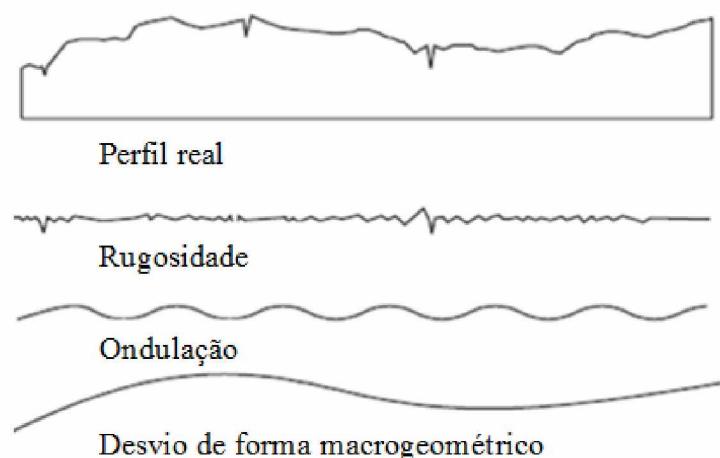


Figura 2.2 – Composição da superfície (ABNT, 2002).

Para a medição da rugosidade são utilizados instrumentos específicos, podendo essa medição ser com contato e sem contato. Na medição com contato, a ponta de um apalpador percorre uma trajetória descrita em função de um comprimento, definido por comprimento de amostragem (L_e), cujo valor é determinado pela norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). A distância percorrida pelo apalpador deve então ser igual a sete comprimentos de amostragem, como pode ser visualizado na Fig. 2.3. Geralmente, os valores de L_e , L_v e L_n são iguais.

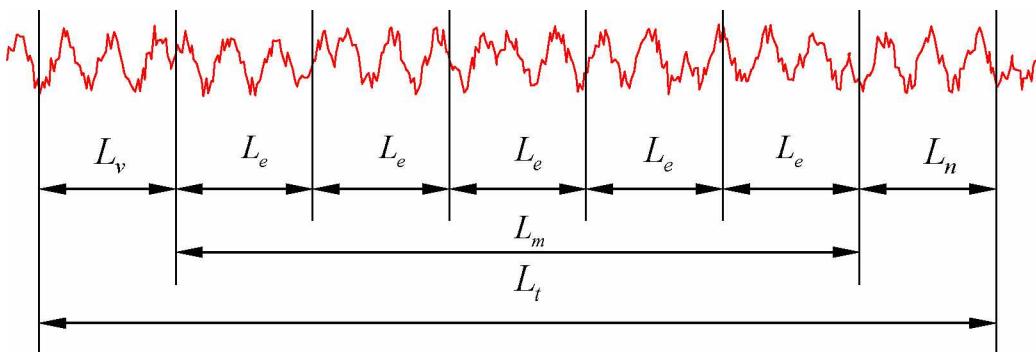


Figura 2.3 – Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994).

Em que:

Percorso inicial (L_v): Não é utilizado para avaliação, tendo por finalidade permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elásticas iniciais do sistema e centragem do perfil de rugosidades;

Percorso de medição (L_m): É a extensão do trecho útil da medição, onde a medida deve ser realmente efetuada;

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 (Filtros Passa-alta). O objetivo é eliminar o efeito dos desvios de forma macrogeométricos na avaliação da rugosidade.

O valor do *cut-off* deve ser determinado de acordo com a Tab. 2.1 da norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008) e está relacionado, neste caso, com o valor do parâmetro de rugosidade R_a .

Tabela 2.1 – Comprimentos de amostragem (ABNT, 2008).

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

Percorso final (L_n): Não é utilizado para avaliação, tendo a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição;

Percorso total (L_t): É a extensão total percorrida pelo sensor ou apalpador e pode ser calculado via Eq. (2.1).

$$L_t = L_v + L_m + L_n \quad (2.1)$$

Para a medição da rugosidade, há dois sistemas de medição: o da linha média e o da envolvente. Alguns países adotam ambos os sistemas. No Brasil, o sistema padronizado é o sistema da linha média, de acordo com as normas ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008).

A linha média é definida como uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre a linha e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem, como indicado na Fig. 2.4.

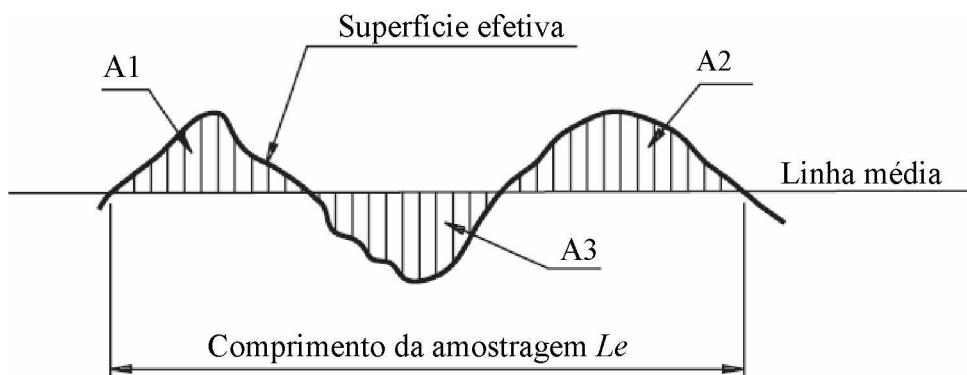


Figura 2.4 – Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Neste sistema, todos os parâmetros de rugosidade são definidos a partir do conceito da linha média, que, por sua vez, define três grupos de parâmetros geométricos que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade.

Tais parâmetros são:

- a) Parâmetros de Amplitude: são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- b) Parâmetros de Espaçamento: são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- c) Parâmetros Híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

A ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) fornece, ainda, o nome e o símbolo destes parâmetros, como pode ser visto na Tab. 2.2 e algumas curvas que podem ser utilizadas para avaliar a rugosidade, Tab. 2.3, sendo a de maior destaque a curva de *Abbott Firestone*.

Tabela 2.2 – Parâmetros usados para avaliar a rugosidade (ABNT, 2002).

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

Tabela 2.3 – Curvas e parâmetros relacionados (ABNT, 2002).

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

2.1.1 Parâmetros de Rugosidade abordados

Altura máxima do pico do perfil (R_p): é definida como a maior altura dos picos do perfil Z_p no comprimento de amostragem (Fig. 2.5).

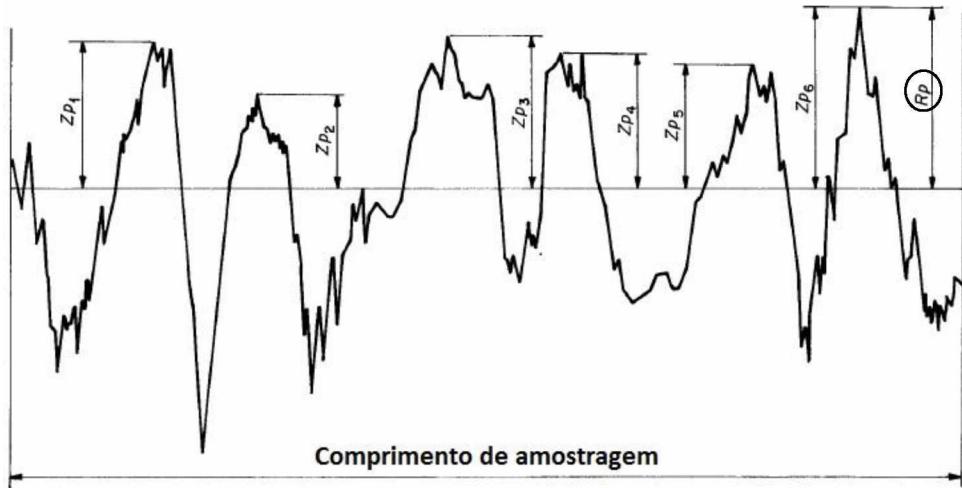


Figura 2.5 – Altura máxima dos picos do perfil (ABNT, 2002).

Profundidade máxima do vale do perfil (R_v): é a maior profundidade do vale do perfil Z_v no comprimento de amostragem (Fig. 2.6).

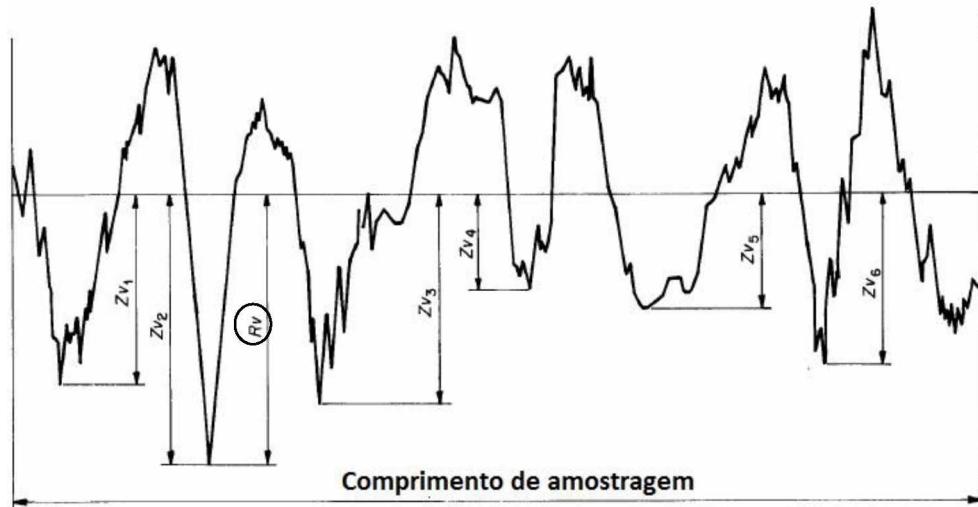


Figura 2.6 – Profundidade máxima do vale do perfil (ABNT, 2002).

Altura máxima do perfil (R_z): corresponde à soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v , no comprimento de amostragem (Fig. 2.7).

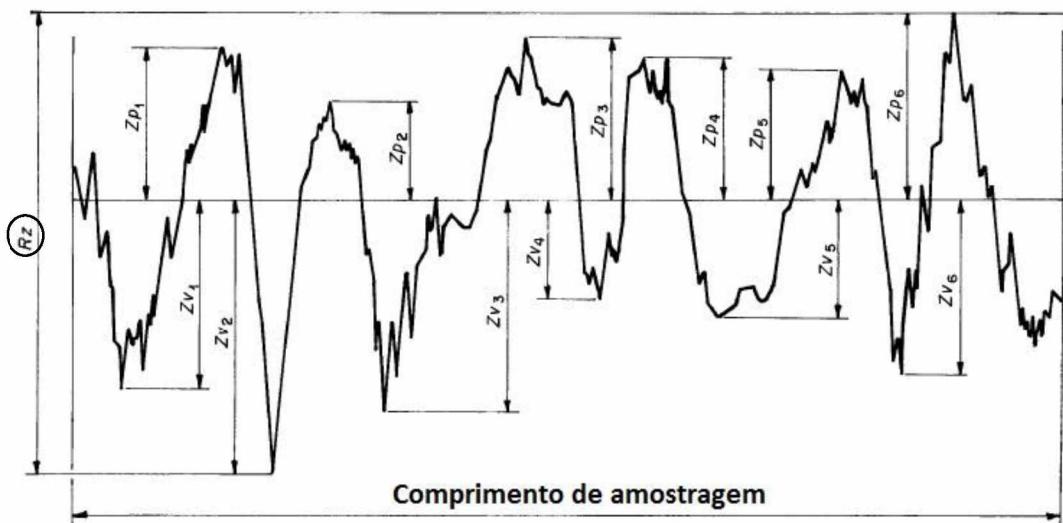


Figura 2.7 – Altura máxima do perfil (ABNT, 2002).

O parâmetro Rz pode passar uma informação equivocada da superfície, uma vez que detecta defeitos superficiais como poros e riscos que não são representativos da rugosidade, o que pode induzir o aparecimento de erros de medição significativos. Este parâmetro sozinho não apresenta informação suficiente do formato da superfície. A Fig. 2.8 apresenta quatro perfis de rugosidade diferentes com o mesmo valor de Rz .



Figura 2.8 – Perfis de rugosidade com o mesmo valor de Rz (LEACH, 2001).

Altura total do perfil (Rt): corresponde a soma das maiores alturas de pico do perfil Zp e das maiores profundidades dos vales do perfil Zv no comprimento de avaliação. Representa a máxima deterioração da superfície vertical da peça, sendo de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície. Possui grande aplicação na maioria dos países e fornece informações complementares ao Ra (PIRATELLI-FILHO, 2011).

Desvio aritmético médio do perfil avaliado (Ra): é o parâmetro mais utilizado para avaliar a rugosidade. Matematicamente, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento $Z(x)$, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, no comprimento de amostragem, calculado via Eq. (2.2).

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z(x)| dx , \quad \text{com } l = L_e \quad (2.2)$$

Embora o parâmetro R_a seja aquele que fornece maior quantidade de informação sobre o perfil de rugosidade, somente ele não é capaz de descrever totalmente uma superfície. A Fig. 2.9 apresenta superfícies diferentes que possuem o mesmo valor de R_a .

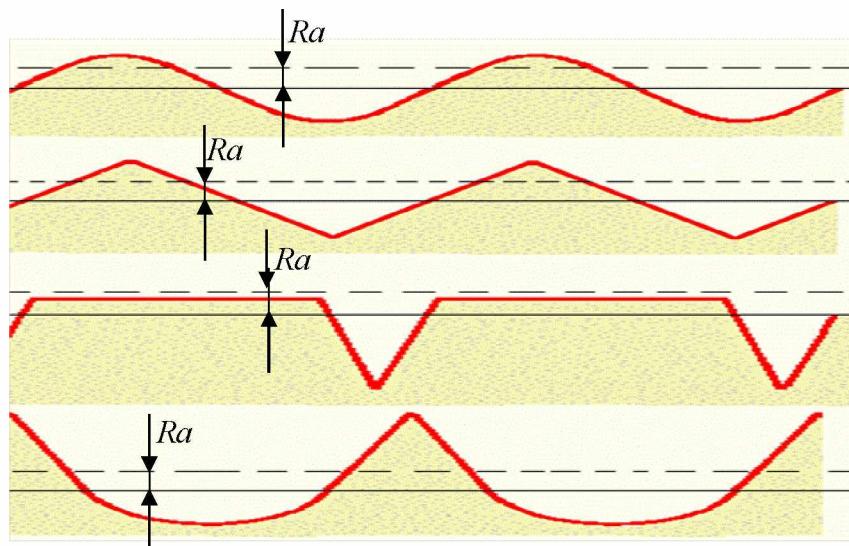


Figura 2.9 - Representação do R_a para perfis diferentes (TAYLOR HOBSON, 2003).

Desvio médio quadrático do perfil avaliado (Rq): é definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, $Z(x)$, no comprimento de amostragem, calculado via Eq. (2.3). O parâmetro Rq evidencia os picos e vales presentes na superfície, pois eleva ao quadrado o valor das ordenadas, ressaltando-os. Deste modo, é muito utilizado para superfícies em que o parâmetro Ra apresenta pouca resolução ou em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \int_0^l Z^2(x) dx} , \quad \text{com } l = L_e \quad (2.3)$$

Fator de assimetria do perfil avaliado – *Skewness (Rsk)*: este parâmetro, calculado via Eq. (2.4), indica a assimetria da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas $Z(x)$ dos pontos do perfil em relação à linha média. O fator de assimetria indica se as irregularidades da superfície são, em sua maioria, picos ou vales (Fig. 2.10), sendo avaliado frequentemente

em superfícies onde, por exemplo, deseja-se reduzir a altura dos picos para melhorar a retenção de lubrificante, diminuindo o atrito.

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \cdot \left[\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} Z^3(x) dx \right] \quad (2.4)$$

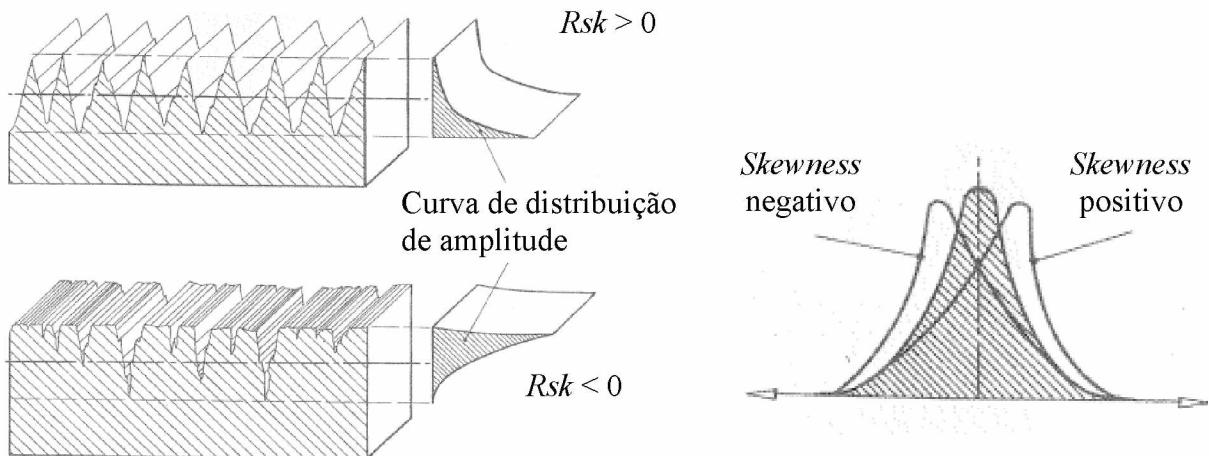


Figura 2.10 – Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

Fator de achatamento do perfil avaliado – *Kurtosis (Rku)*: é definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ e Rq à quarta potência, respectivamente, no comprimento de amostragem, calculado pela Eq. (2.5). O parâmetro *Rku* é indicador do achatamento da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas. Este parâmetro mede a forma da curva de distribuição de amplitude, ou seja, seu afinamento ou achatamento, como mostrado na Fig. 2.11.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \cdot \left[\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} Z^4(x) dx \right] \quad (2.5)$$

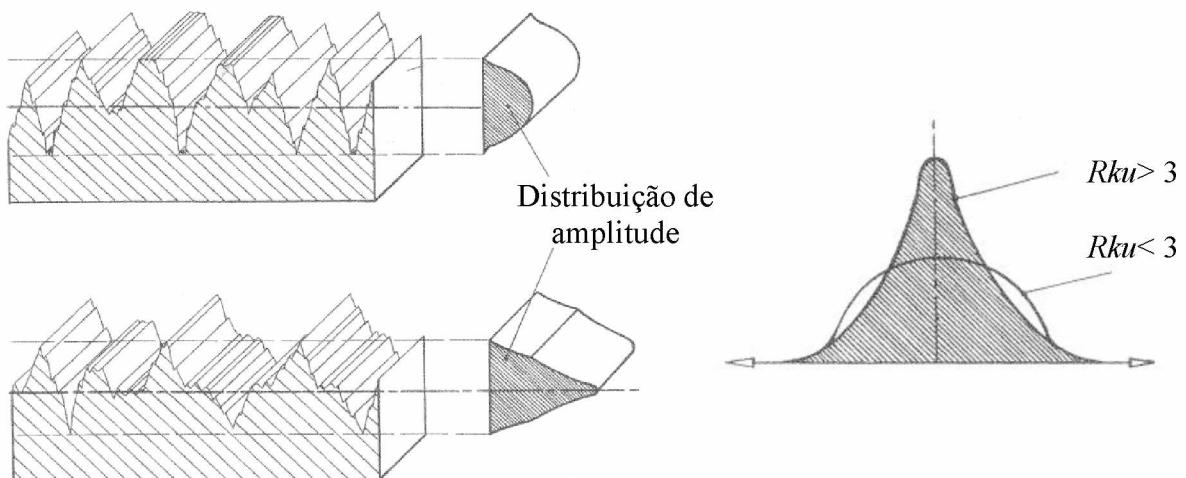


Figura 2.11 – Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002).

2.1.2 Métodos de Medição de Rugosidade

Para efetuar uma avaliação detalhada e precisa da rugosidade devem ser utilizados instrumentos de medição adequados, conhecidos como rugosímetros, interferômetros, perfilômetros, dentre outros. Conforme a norma ASME B46.1 (ASME, 2002), basicamente existem três grupos de instrumentos de medição de textura superficial, que são: instrumentos com perfil completo, instrumentos com capacidade limitada de parâmetros e de perfil e instrumentos somente com parâmetros.

2.1.3 Instrumento de medição rugosímetro

Os rugosímetros (instrumento com perfil completo) podem ser eletromecânicos (Fig. 2.12), ópticos e a laser. Eles diferenciam-se pelo tipo de sensor de medição, que podem ser apalpadores, feixe de luz ou de elétrons, respectivamente. Os mais utilizados para a avaliação da rugosidade são os aparelhos eletromecânicos caracterizando a medição com contato (NOVASKI, 1994).



Figura 2.12 – Rugosímetro eletromecânico digital (TAYLOR HOBSON, 2003).

2.1.4 Medição com contato da rugosidade

Nos rugosímetros eletromecânicos, um apalpador com ponta de diamante faz a varredura da superfície fornecendo o perfil de rugosidade, caracterizando esta medição como medição com contato, comumente utilizado na indústria (CHAND et al., 2011). A ponta do apalpador no rugosímetro (Fig. 2.13) é fabricada de diamante sintético em função de seu alto grau de dureza, podendo ser riscada somente por um outro diamante.



Figura 2.13 – Visualização da ponta de diamante de um rugosímetro com sapata (filtro mecânico).

Estes equipamentos permitem a medição de amplas faixas de textura superficial, desde superfícies consideradas lisas até algumas superfícies ásperas e geração de perfis filtrados ou não filtrados. Ainda, esses equipamentos têm a capacidade de calcular parâmetros e podem emitir registros do perfil graficamente via análise computacional (MACHADO, 2009).

A maioria dos instrumentos de medição de textura superficial baseia-se no princípio da identificação das irregularidades presentes na superfície por meio de um apalpador que desloca sobre a superfície em uma determinada velocidade e comprimento de análise. Um sinal elétrico é obtido e amplificado para produzir uma caracterização da textura superficial. Os componentes básicos na medição com instrumento de medição com contato são: a amostra a ser medida, o apalpador que está em contato com a superfície da amostra realizando a varredura superficial e o registro emitido pelo instrumento após a medição com o perfil efetivo (MACHADO, 2009). A Fig. 2.14 mostra um perfil bidimensional.

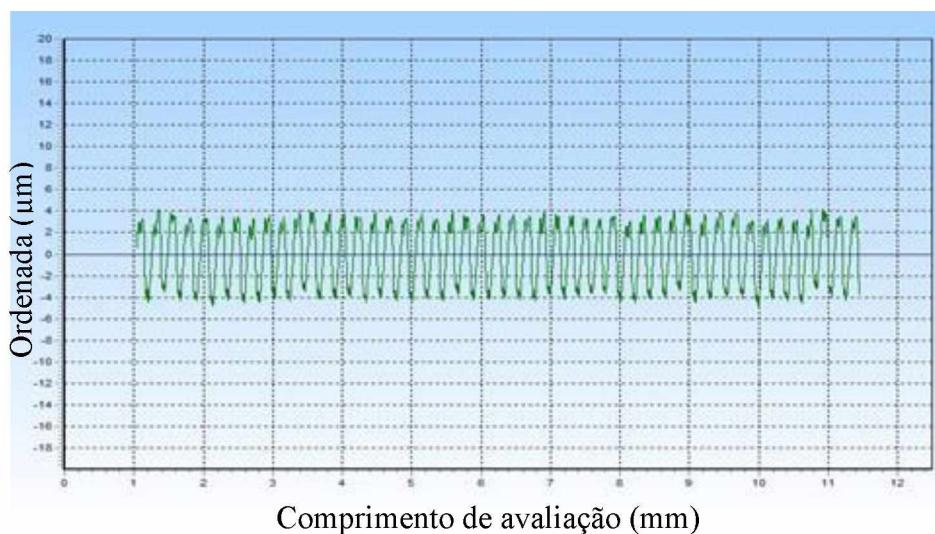


Figura 2.14 – Perfil efetivo de rugosidade de uma amostra de alumínio (DOBES, 2014).

As dimensões e a forma dos apalpadores têm forte influência nas informações obtidas pelo respectivo aparelho de medição. Segundo a norma ABNT NBR ISO 3274 (ABNT, 2008), a geometria da ponta pode ser cônica com ponta esférica ou tipo pirâmide truncada com ponta retangular.

Antes de ser utilizado, o rugosímetro precisa ser calibrado. Haitjema (1998) descreve com detalhes como um instrumento com sistema de apalpamento pode ser calibrado, respeitando todas as fontes de erros que afetam a incerteza de medição da rugosidade, como as associadas à geometria da ponta. Para este parâmetro em específico foi determinada a incerteza medindo-se a ponta de uma lâmina não revestida, visto que estudos comprovam a eficácia e confiabilidade desse método de determinação, no qual o raio efetivo da lâmina é menor do que 0,1 μm .

2.1.5 Fontes de erro na medição com contato da rugosidade

A medição com contato da rugosidade é a técnica mais utilizada para caracterização de superfícies (HAITJEMA, MOREL, 2000; LEACH, 2001). Dentre as fontes de erros neste tipo de medição pode-se citar: dimensões e geometria da ponta do apalpador, deformação da peça devido à força de medição, direção de apalpamento, condições ambientais como a vibração mecânica, características dos filtros *cut-off* e a incerteza associada à calibração do rugosímetro.

2.1.5.1 Dimensões e geometria da ponta do apalpador

Durante a medição com contato da rugosidade é impossível obter o perfil real da superfície devido às dimensões da ponta do apalpador, como pode ser visualizado na Fig. 2.15. Por menor que seja o raio da ponta do apalpador, o mesmo não pode reconhecer de forma completa as irregularidades da superfície que estejam em níveis mais profundos do que a ponta possa apalpar. Sendo assim, sempre ocorre uma distorção entre os perfis reais e efetivos. Dependendo do nível de detalhamento exigido em relação à superfície analisada, deve-se optar por apalpadores de raios menores.

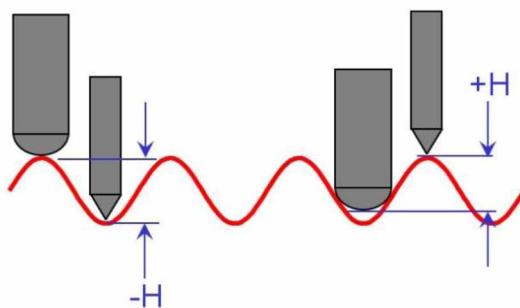


Figura 2.15 – Influência das dimensões da ponta do apalpador na obtenção do perfil de rugosidade (TAYLOR HOBSON, 2003).

Dagnall (1998) avaliou a rugosidade de quatro superfícies com diferentes rugosidades usando apalpadores com raios de ponta diferentes ($1,25 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$, respectivamente). Este autor observou uma redução no valor do parâmetro R_a , sendo esta de $4,50 \mu\text{m}$ para $3,25 \mu\text{m}$ na primeira superfície, de $8,0 \mu\text{m}$ para $7,5 \mu\text{m}$ na segunda, de $11 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$ na terceira e de $26 \mu\text{m}$ para $25 \mu\text{m}$ na quarta superfície. Observa-se que os valores de rugosidade obtidos utilizando a ponta com raio de $10 \mu\text{m}$ são menores, com redução da ordem de 28%, 7%, 10% e 4%, respectivamente. E que o maior efeito é observado para valores de rugosidade menores.

Song et al. (2014) também avaliaram o efeito da dimensão da ponta do apalpador na medição considerando como base o parâmetro R_a na calibração de amostras com perfis retangulares e trapezoidais de rugosidade. Dentre os principais resultados deste trabalho tem-se: a dimensão da ponta afeta quase todos os parâmetros de superfície em diferentes graus, alguns em menor escala do que o R_a , outros em maior; e a correção de tal efeito depende da definição do mensurando, de modo que a mesma deve ser feita quando o parâmetro medido é referente à superfície real ou efetiva da peça. Porém, é muito comum, na prática em laboratórios, não haver a correção deste efeito na especificação do resultado da rugosidade de uma superfície, mesmo em aplicações nas quais a dimensão da ponta seja um dos principais contribuintes para o erro de medição.

2.1.5.2 Força de medição

Um fator que também influencia na medição de rugosidade é a força exercida pelo conjunto mecânico durante a medição a qual é resultante da combinação de forças estáticas e dinâmicas. A força dinâmica não é especificada em normas técnicas pelo fato de ser de difícil quantificação e, ainda, por variar em função da localização do apalpador e da velocidade de medição. A força estática de medição recomendada tem relação com as dimensões do apalpador, sendo geralmente definida pelo fabricante, e assume 0,75 mN, de acordo com a ABNT NBR ISO 3274 (ABNT, 2008).

Quando a força for muito baixa, a ponta do apalpador pode não manter o contato com a superfície da peça durante todo o percurso de medição, fornecendo informações incorretas sobre os valores de rugosidade da superfície (LEACH, 2001). Em função da combinação da geometria da ponta e da força exercida durante a medição, pode-se ter uma pequena área de contato de modo que a pressão local pode ser suficientemente elevada para provocar deformação elástica significativa da superfície medida, como observado na Fig. 2.16. Neste caso, uma amostra de alumínio torneada foi medida por meio de um rugosímetro eletromecânico, com ponta de diamante com raio de 2 μm .

Observa-se, ainda na Fig. 2.16, que a ponta do apalpador deformou significativamente os picos deixando uma trilha em cada medição.

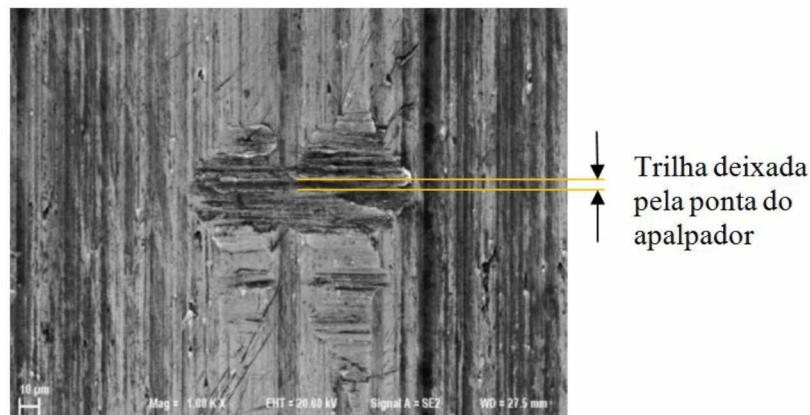


Figura 2.16 – Deformação de uma amostra de alumínio torneada, observada no MEV, após a medição de rugosidade por meio de um rugosímetro eletromecânico, com ponta de diamante com raio de 2 µm (DOBES et al., 2017).

Para materiais dúcteis ou de reduzido módulo elástico como alguns aços, prata, ouro, chumbo, polímeros e elastômeros podem ser observados riscos na superfície após a medição (POON, BHUSHAN, 1995; BHUSHAN, 2000). Desta forma, destaca-se a necessidade da escolha adequada das dimensões e da geometria da ponta. A forma ideal da ponta é um cone com a ponta esférica (forma conesférica). O tipo esférico tem geralmente um ângulo de cone de 60° ou 90° com um raio típico de 2 µm, 5 µm ou 10 µm (LEACH, 2001), como pode ser visualizado na Fig. 2.17.

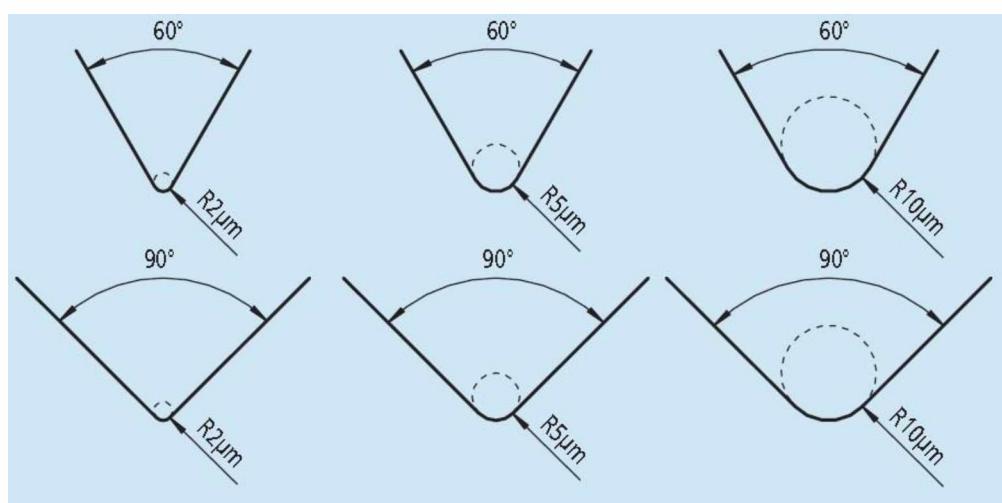


Figura 2.17 - Geometria cônica e ponta esférica do apalpador com diferentes valores de raio e ângulo de cone (MITUTOYO, 2016).

2.1.5.3 Direção de apalpamento

Outro aspecto importante da medição da rugosidade é a direção de apalpação, que deve ser definida conforme a orientação preferencial dos sulcos ou marcas presentes na superfície da peça. Quando a superfície apresentar sulcos nítidos e com uma orientação definida, a direção de apalpação escolhida deve ser perpendicular a estes. Deve-se evitar que a medição seja realizada em regiões onde hajam defeitos como poros, pois estes não fazem parte da rugosidade. Para aqueles casos em que os sulcos ou marcas não sejam visíveis ou não apresentem uma orientação definida, a direção de apalpação pode ser arbitrária. Segundo Leach (2001), neste caso, devem ser efetuadas medições em várias direções, e aceitar o valor máximo como sendo o valor de rugosidade.

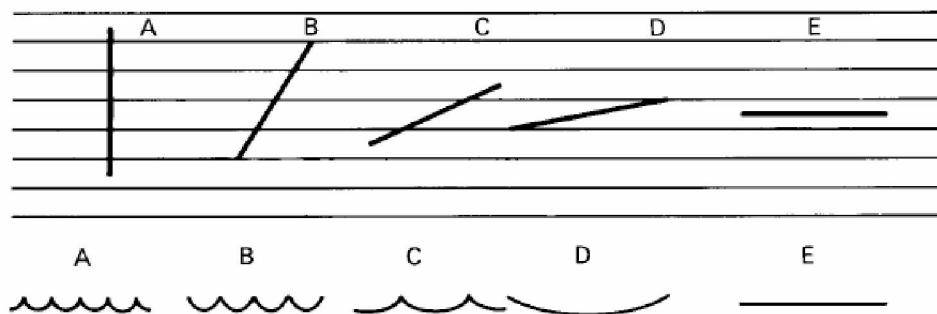


Figura 2.18 – Efeito da direção de apalpação no perfil efetivo da rugosidade (LEACH, 2001).

Como pode ser apontado na Fig. 2.18, à medida em que a direção de apalpação passa da posição perpendicular aos sulcos (em A) para a posição paralela aos sulcos (em E), o perfil resultante representado pela seção transversal do perfil efetivo se deforma, de modo que nesta última condição, as características da rugosidade foram completamente eliminadas.

2.1.5.4 Vibração mecânica

A medição da rugosidade também está sujeita a erros relacionados às condições ambientais, de modo que a vibração mecânica transmitida pelo solo ocupa um lugar de destaque, aumentando sua importância quando são utilizados rugosímetros portáteis de medição com contato. Para valores de rugosidade pequenos, da ordem de alguns décimos de micrometros, a medição com instrumentos com apalpação torna-se difícil, pois a amplitude da vibração mecânica do ambiente pode ser da mesma ordem de grandeza que a rugosidade. Desta forma, a medição da rugosidade com instrumentos de apalpação deve ser realizada num

ambiente o mais livre possível de vibração. Entretanto, o isolamento e controle da vibração são dispendiosos e muitas vezes impraticáveis, sobretudo no chão de fábrica, em função, principalmente, da presença de grande quantidade de equipamentos e máquinas-ferramenta em operação nestes locais (LYNCÉE TEC, 2012).

2.1.5.5 Características dos filtros

O modo mais fácil para separar os componentes de sinal em uma base de frequência é através do uso de filtros. Eles têm a grande vantagem de ajustar em cima de uma curva algum tipo de polinômio (OLIVEIRA, 2004). Segundo Whitehouse (1994), o filtro opera na forma da onda e conforme a onda é recebida é necessário “limpar” o sinal antes de fornecer resultados úteis. Assim, a quantidade de dados utilizáveis em uma análise está reduzida na eficiência do filtro.

O efeito de se utilizar diferentes tipos de filtro é demonstrado no caso extremo de um componente com inclinações de perfil vertical. A distorção aparente do perfil real não afeta em muito a avaliação de parâmetros, esta situação é exemplificada na Tab. 2.4, onde é representado o sinal capturado pelo apalpador e o efeito da filtragem ISO 2CR e gaussiana (OLIVEIRA, 2004).

Tabela 2.4 - Efeito dos tipos de filtro nas análises de textura (OLIVEIRA, 2004).

A	Sem filtro	
B	Filtro ISO 2CR	
C	Filtro gaussiano	

Nota-se que o filtro ISO 2CR, nas saídas dos vales, intenciona a formar falsos picos, de modo que estes são incluídos na análise. Já o filtro gaussiano possui a característica de amenizar a amplitude do sinal dando mais suavidade aos contornos da superfície (WHITEHOUSE, 1994), com isso falsos picos, que podem ser oriundos de poros, são removidos da análise.

Uma possível solução para amenizar as fontes de erro na medição de rugosidade encontradas na medição com contato seria a realização de medição sem contato por meio de interferometria (CHAND et al., 2011). Para tanto, são utilizados interferômetros com luz branca

ou laser que possibilitam uma medição sem contato, onde o perfil efetivo da rugosidade se aproxima do real com maior exatidão, precisão e confiabilidade. Segundo Vorburger et al. (2007), as diferenças encontradas entre valores de rugosidade, na faixa de 50 nm a 300 nm, aplicando ambos os métodos de medição (com contato e sem contato) podem ser de aproximadamente 75%.

Arantes et al. (2017) avaliaram a rugosidade do cilindro de compressores herméticos fabricados em ferro fundido cinzento usinados pelos processos de brunimento convencional e flexível. Os valores médios dos parâmetros obtidos durante a medição com contato e sem contato são mostrados na Fig. 2.19. Estes autores observaram que os valores médios dos quatro parâmetros avaliados são significativamente maiores para a medição sem contato, dando destaque ao parâmetro Spk , após o brunimento flexível com um aumento de 82% em relação ao Rpk . A diferença entre os valores médios de Ra e Sa foi da ordem de 68% (após o brunimento convencional) e de 73% (após o brunimento flexível).

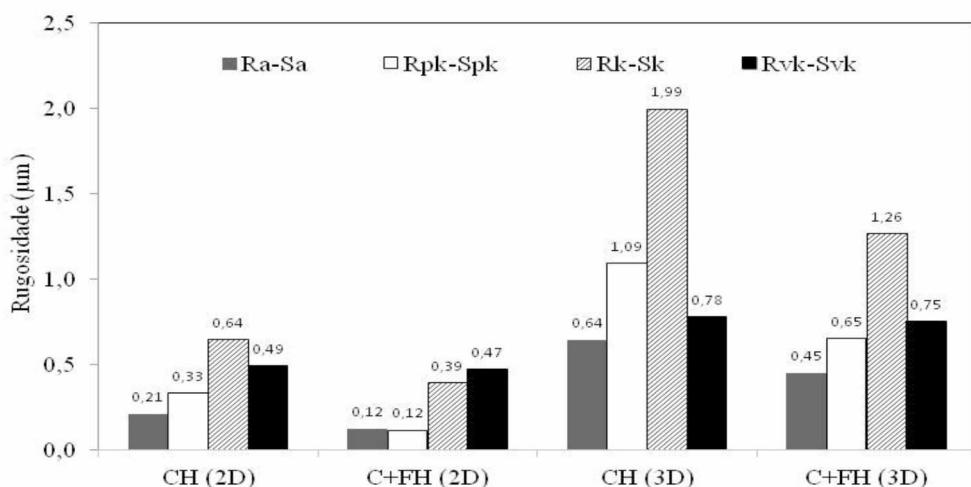


Figura 2.19 – Valores médios de rugosidade obtidos em cilindros de compressores herméticos usinados pelo brunimento convencional (CH) e brunimento convencional mais o flexível (C+FH) durante a medição com contato (2D) e sem contato (3D) (ARANTES et al., 2017).

2.2 Fundamentos Básicos de Usinagem

Ferraresi (1970) define “operações de usinagem” como sendo uma operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Este autor ainda define cavaco como sendo a porção de

material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Os processos de usinagem podem ser classificados em duas categorias: processos convencionais e processos especiais (não-convencionais). Os processos convencionais são caracterizados por empregar energia mecânica na remoção do material nas operações de corte, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça (SOUZA, 2011), destacando-se, entre eles, o torneamento e o fresamento.

2.2.1 Torneamento e fresamento

O torneamento e o fresamento são caracterizados por operações de corte com ferramentas de geometria definida, ou seja, arestas cortantes com formato e tamanho conhecidos (SOUZA, 2011).

O torneamento é um processo mecânico destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (com uma única superfície de saída). Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (SOUZA, 2011). Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo (ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea) ou curvilíneo (a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea). Ainda, o torneamento retilíneo pode ser cilíndrico, cônicoo, radial e perfilamento. No torneamento radial de faceamento, a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina visando a obtenção de uma superfície plana. A Figura 2.20 exemplifica os tipos de torneamento retilíneo de faceamento e curvilíneo.

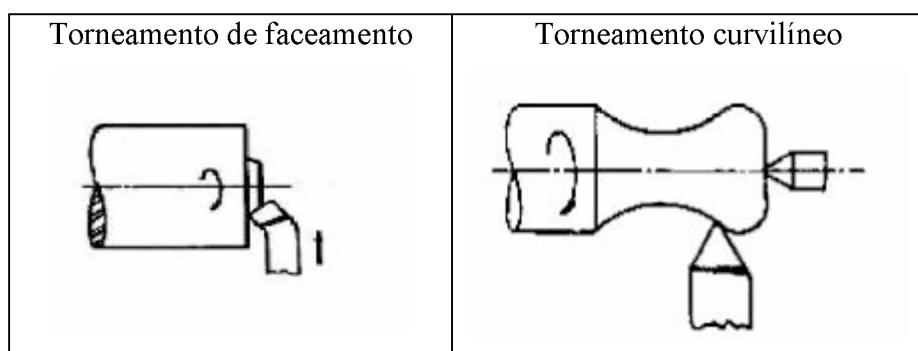


Figura 2.20 - Representação esquemática do torneamento de faceamento e torneamento curvilíneo (FERRARESI, 1970).

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. É um dos métodos de

usinagem de maior versatilidade, em que há a possibilidade de se atingir um bom acabamento superficial. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento: tangencial e frontal (de topo) (SOUZA, 2011). O fresamento frontal é destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta, ao passo que no tangencial a superfície é paralela ao eixo de rotação.

Cada um desses processos depende de diversos fatores para início de operação, que vão desde a escolha do material a ser usinado até à determinação das condições de corte que devem ser utilizadas. A melhora na operação de usinagem está relacionada com a obtenção de componentes com as dimensões desejadas e qualidade superficial satisfatória. As vantagens econômicas da escolha correta do material a ser usinado, assim como as ferramentas, equipamento e condições de usinagem, são consideráveis. Os custos e tempos de produção podem ser significativamente reduzidos através da escolha certa desses parâmetros (TESSLER, BARBOSA, 1993).

2.2.2 Parâmetros de corte

As grandezas de corte são as grandezas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente 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).

Considerando uma operação de fresamento, por exemplo, o avanço refere-se a distância linear percorrida pelo conjunto de dentes que compõe a fresa durante uma rotação completa da mesma. Já a profundidade de corte refere-se à quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (na direção do eixo da fresa). O esquema do processo de fresamento frontal pode ser visualizado na Fig. 2.21. Ainda, na Fig. 2.22, é apresentado também a representação esquemática do processo de torneamento de faceamento.

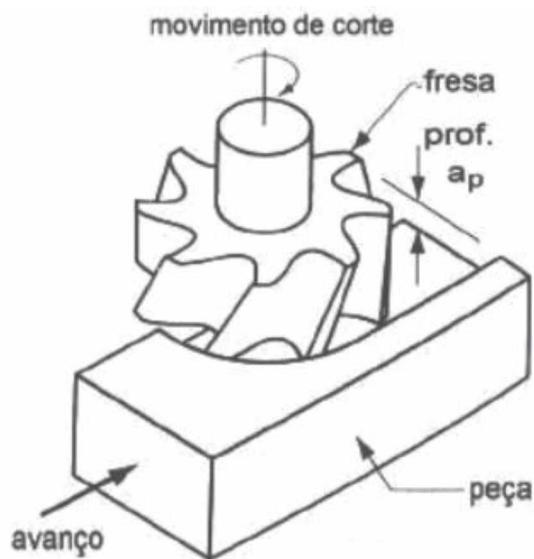


Figura 2.21 - Esquema representativo do processo de fresamento frontal (BARBOSA, 2014).

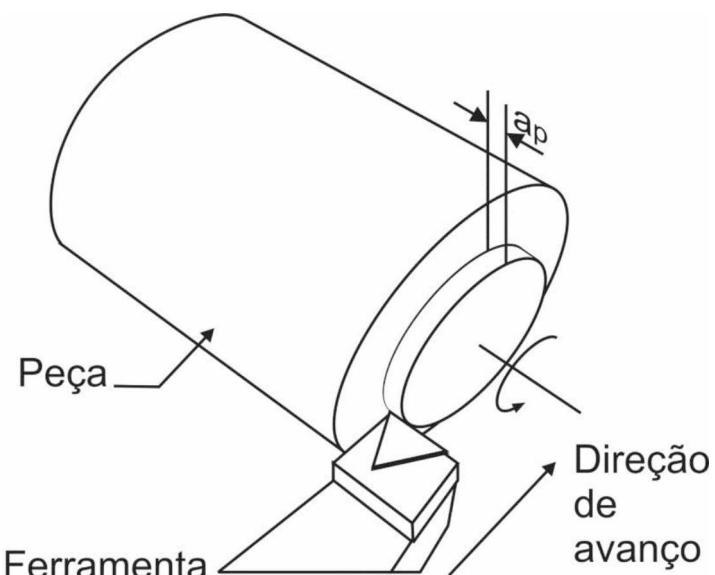


Figura 2.22 - Esquema representativo do processo de torneamento de faceamento.

Os parâmetros de corte estão relacionados com diversas características dos processos de usinagem como, por exemplo, a forma do cavaco produzido. Em geral, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída, tende a produzir cavacos em fitas (ou contínuos, quanto ao tipo). O avanço é o parâmetro mais influente na determinação da forma do cavaco e a profundidade de corte o menos influente. A Fig. 2.23 mostra como as formas dos cavacos são afetadas pelo avanço e pela profundidade de corte (SMITH, 1989).

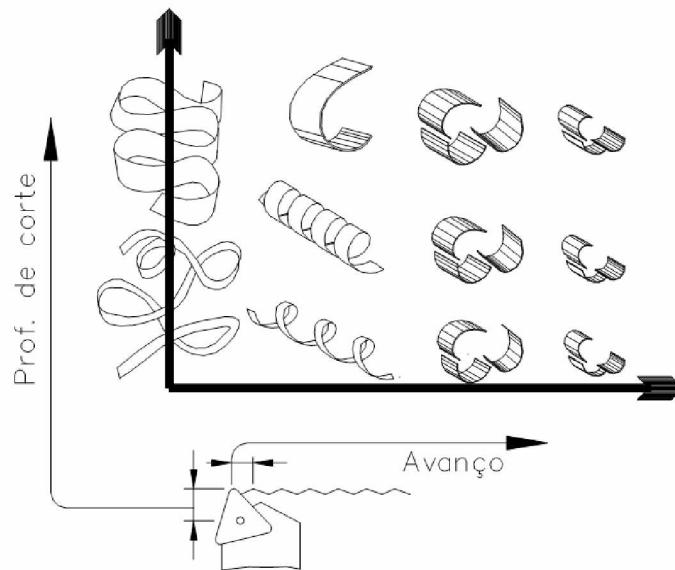


Figura 2.23 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989).

2.2.3 Integridade Superficial na Usinagem

Segundo Machado et al. (2009), o termo “Integridade Superficial” é utilizado para denotar as condições das superfícies usinadas, descrevendo a qualidade dessas superfícies. O acabamento superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, quer seja a geometria da ferramenta de corte incluindo o processo de usinagem adotado, a geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, dentre outros.

Relacionado ao material da peça, a composição química, dureza, microestrutura e consistência metalúrgica são fatores que podem afetar o acabamento das superfícies. Em geral, esse acabamento é melhorado com uma granulação fina e alta dureza dos microconstituintes, alta consistência nas propriedades (ao longo de toda seção transversal) e alta dureza associada à baixa ductilidade. Davim (2010) realizou estudos sobre o comportamento no torneamento dos materiais aço carbono e alumínio e no fresamento de ferro fundido cinzento, obtendo topografias das superfícies em 3D, exibidas na Fig. 2.24.

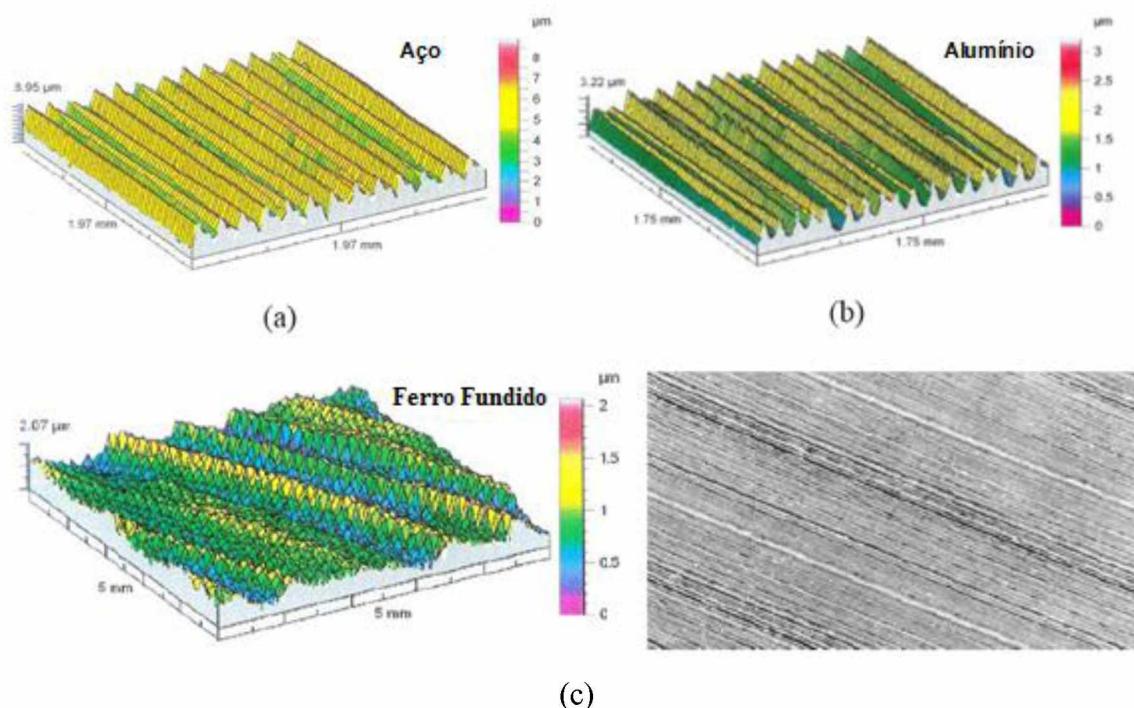


Figura 2.24 - Topografias superficiais de amostras torneadas de (a) aço carbono e (b) alumínio e amostra fresada de (c) ferro fundido cinzento (DAVIM, 2010).

De acordo com a Fig. 2.24, no torneamento, considerando que, para ambos os materiais, o avanço adotado foi igual a 0,1 mm/rot, o alumínio forneceu menores valores de R_a (igual a 0,563 μm) diante do aço carbono ($R_a = 1,23 \mu\text{m}$), indicando um melhor acabamento superficial. Entre os processos de torneamento e fresamento, percebe-se a diferença entre a textura superficial produzida em cada um, uma vez que no primeiro a superfície gerada apresenta perfil helicoidal, ao passo que no segundo resulta em um perfil mais ondulado.

2.2.4 Considerações quanto ao Material da Peça

A propriedade que indica a facilidade ou dificuldade com que um determinado material pode ser usinado é denominada de usinabilidade. Arfeld e Hanum (1977) comentam que a usinabilidade de um material pode ser definida por um valor numérico comparativo, que expressa um conjunto de propriedades de usinagem do material em relação a outro tomado como padrão. Essas propriedades são: vida da ferramenta de corte; força de usinagem; acabamento superficial da peça; temperatura de corte; produtividade da máquina operatriz; e as características do cavaco. A usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas, sim, um resultado da interação do metal com a operação de usinagem associada às características da ferramenta de corte.

Para se usinar com baixas forças de corte, baixas tensões, baixas temperaturas de corte e, portanto, pequenas taxas de desgaste e boa usinabilidade, são desejáveis propriedades no material da peça como baixa dureza, baixa ductilidade, alta condutividade térmica, baixa reatividade química com a ferramenta e com a atmosfera, entre outras (MILLS, REDFORD, 1983). Infelizmente baixa dureza é geralmente associada a alta ductilidade, que é indesejável, porque promove elevados comprimentos de contato cavaco-ferramenta, altas forças de usinagem e pobres acabamentos superficiais. Desta forma, deve-se existir um equilíbrio entre essas duas propriedades.

Na seleção de um material, geralmente, boa usinabilidade é um fator secundário quando comparado com outras propriedades requeridas. Entretanto, onde não for comprometedor, deve-se buscar sempre o melhoramento de uma ou várias propriedades das citadas acima, mesmo que isto represente sacrifícios em outras propriedades. Por exemplo, a adição de elementos/componentes como sulfetos, chumbo, selênio, telúrio e grafite, sempre aumentará a usinabilidade enquanto que a adição de partículas abrasivas duras como carbonetos, nitretos ou carbonitretos, são sempre prejudiciais, pois eles aumentarão o desgaste abrasivo da ferramenta de corte (MACHADO et al., 2009).

2.2.4.1 Usinagem do Aço

Os aços perfazem uma grande porcentagem dos materiais utilizados na indústria metálica, para as mais diversas aplicações, devido à suas boas propriedades mecânicas, grande disponibilidade e custo relativamente baixo dependendo da liga considerada. Apesar de alguns aços terem usinabilidade melhorada, a maioria apresenta baixa usinabilidade. Talvez, um dos maiores problemas na usinagem dos aços é a produção de cavacos contínuos e, geralmente, longos (MACHADO, DA SILVA, 2004). Outros fatores também contribuem para dificultar a usinagem, entre eles, o alto ponto de fusão, as altas temperaturas desenvolvidas na superfície das ferramentas (o que acontece à uma certa distância da aresta de corte) que aumentam a deterioração da ferramenta e as altas tensões de compressão.

2.2.4.2 Usinagem do Ferro Fundido Cinzento

A usinagem deste grupo de material pode variar desde muito fácil de se usinar, como no caso do ferro fundido cinzento ferrítico ($HB \approx 120$), até muito difícil de se usinar, como no caso do ferro fundido branco ($HB \approx 550$). É evidente, portanto, que como no caso dos aços, a usinabilidade dos ferros fundidos vai depender da composição química e da microestrutura

(MACHADO, DA SILVA, 2004). A dureza do ferro fundido cinzento, e, portanto, o desgaste da ferramenta, aumenta com o aumento da porcentagem de perlita e cementita. Os flocos de grafita no ferro fundido cinzento diminuem a ductilidade do ferro fundido, o que ajuda a quebrar os cavacos, dando um comprimento de contato cavaco-ferramenta pequeno, relativamente baixas forças de usinagem e potência consumida, baixas taxas de desgaste e altas taxas de remoção de material (MILLS, REDFORD, 1983).

2.2.4.3 Usinagem do Alumínio

Alguns materiais possuem excelente usinabilidade quando se consideram fatores como vida de ferramenta, potência, força ou temperatura de corte, entre outros, no qual o alumínio é um bom exemplo. O alumínio tem um baixo ponto de fusão e pode ser usinado facilmente. Dependendo da liga de alumínio, as forças são baixas, e diminuem com a velocidade de corte. Entretanto, na usinagem de alumínio puro comercial, podem ocorrer altas forças, principalmente à baixas velocidades, em função do significativo comprimento de contato cavaco-ferramenta (MACHADO, DA SILVA, 2004).

2.3 Planejamento de experimentos

Para Montgomery (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos (*Design of Experiment – DOE*) são utilizadas para melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, dentre outros).

Com a finalidade de melhorar a qualidade industrial, a produtividade, o desempenho do produto final, os custos das operações, entre outras características, as empresas realizam vários experimentos para encontrar os níveis ótimos dos parâmetros que regulam seus processos de fabricação.

Um dos problemas encontrados ao realizar os ensaios é a necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos fatores com diferentes níveis de regulagens. Nesse caso, observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso torna os experimentos industriais inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados. Coleman &

Montgomery (1993) e Montgomery (1991) afirmam que tais problemas podem ser contornados quando os experimentos são planejados e analisados com métodos e técnicas estatísticas.

Os objetivos dessas ferramentas são garantir que as informações sejam confiáveis e que os recursos disponíveis para experimentação sejam bem utilizados (COLEMAN, MONTGOMERY, 1993; MONTGOMERY, 1991).

Os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são: replicação, aleatoriedade e blocagem. O primeiro trata-se de repetições do experimento realizadas sob as mesmas condições experimentais, o que permite a obtenção do erro experimental. Os métodos estatísticos requerem que as observações, ou os erros, sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente.

Assim, os experimentos, com suas réplicas, devem ser realizados de forma aleatória, de modo a garantir a distribuição equânime de todos os fatores não considerados. Por fim, a blocagem ou formação de blocos é uma técnica extremamente importante, utilizada industrialmente que tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos que perturbam o sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los (NETO et al., 2003).

O ideal em qualquer comparação de grupos por testes paramétricos, como o ANOVA, é conter variâncias homogêneas e grupos com distribuição normal. A ANOVA (Análise de Variância) procura verificar se existem diferenças entre as médias dos grupos. Faz isso determinando a média geral e verificando quão diferente cada média individual é da média geral (DANCEY, REIDY, 2006).

Os pressupostos básicos da análise de variância são: as amostras serem aleatórias e independentes, as populações terem distribuição normal e as variâncias populacionais serem iguais. Utiliza basicamente duas ferramentas, a saber: o teste de hipótese e a distribuição de probabilidade Fisher-F com nível de significância determinado, geralmente igual a 5%.

As hipóteses nulas e alternativa da análise a serem testadas na análise de variância são:

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

A hipótese nula H_0 é a alegação inicialmente assumida como verdadeira. A hipótese alternativa H_1 é a afirmação contraditória a H_0 . A hipótese nula será rejeitada em favor da hipótese alternativa somente se a evidência da amostra sugerir que H_0 seja falsa. Se a amostra

não contradiz fortemente H_0 , continua-se a acreditar na verdade da hipótese nula. As duas conclusões possíveis de uma análise do teste de hipóteses são, então, rejeitar H_0 ou não rejeitar H_0 (DEVORE, 2006).

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

Por se tratar de um teste bastante difundido, inúmeros *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas possuem o procedimento para ser aplicado automaticamente, como o *software* Statistic 7. Os resultados da análise de variância são apresentados através de um quadro, Tab. 2.5.

Tabela 2.5 - Quadro de ANOVA.

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

Para um conjunto de dados experimentais, a expressão matemática para o cálculo da variância abrange a razão entre a soma dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média de todos os dados e o número total de graus de liberdade. Dividindo-se as somas de quadrados pelos respectivos números de graus de liberdade, se obtêm as estimativas das variâncias entre e dentro das amostras. Tais estimativas são os quadrados médios.

A comparação de valores de quadrados médios é realizada admitindo-se uma hipótese inicial H_0 de que as médias obtidas nas amostras são iguais ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$). Quando o quadrado médio entre amostras apresenta um valor bem superior ao quadrado médio dentro das

amostras, esta hipótese pode ser rejeitada, considerando a teoria das probabilidades com base na distribuição amostral da razão F de Fisher Snedecor entre duas variâncias. Esta relação ou teste F é a razão entre os quadrados médios.

As conclusões extraídas em testes de hipótese estão baseadas em curvas de distribuição de probabilidade. Dois erros podem ser cometidos: erro tipo I e erro tipo II. O tipo I é cometido quando a hipótese H_0 é verdadeira e o teste permite sua rejeição. A probabilidade de cometer este erro pode ser controlada pela seleção da confiança estatística desejada, na realização do teste de hipótese. O erro tipo II é cometido quando a hipótese H_0 é falsa e o teste permite sua aceitação. A probabilidade de se cometer este erro depende do tamanho da amostra, do desvio padrão amostral e do tamanho da diferença entre médias consideradas para rejeitar hipótese de igualdade entre médias.

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

2.4 Incerteza de medição

O guia de título “Expressão da Incerteza de Medição – Avaliação de dados de medição” publicado pelo INMETRO em 2008 é uma tradução do documento ISO/TAG 4/WG 3 (BIPM et al., 2008), atualmente em vigor. Este guia, popularmente conhecido como GUM, estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição, as quais foram propostas para serem aplicadas a um largo espectro de medições.

Em 1977, reconhecendo a falta de consenso internacional sobre a expressão de incerteza de medição, a maior autoridade mundial em metrologia, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), requereu ao Bureau International de Pesos e Medidas (BIPM) o tratamento do problema em conjunto com os laboratórios nacionais de metrologia e a elaboração de uma proposta. O objetivo era desenvolver um documento orientador que forneça regras sobre a expressão de incerteza de medição, com o propósito de promover informação sobre como se chega a uma declaração da incerteza de medição e proporcionar uma base para a comparação internacional de resultados de medição.

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física deve-se sempre apresentar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos em especificações ou normas técnicas. É, portanto, necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade do resultado de medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (BIPM et al., 2008).

O conceito de incerteza como um atributo quantificável é relativamente novo na história da medição, embora os termos “erro” e “análise de erro” tenham sido, há muito, uma parte da prática da ciência da medição ou metrologia. É agora amplamente reconhecido que, quando todos os componentes de erro conhecidos ou presumidos tenham sido avaliados e as correções adequadas tenham sido aplicadas, ainda permanece uma incerteza sobre quão correto é o resultado declarado, isto é, uma dúvida acerca de quão corretamente o resultado da medição representa o valor da grandeza que está sendo medida (BIPM et al., 2008).

O termo “incerteza” significa dúvida, e assim, no sentido mais amplo, “incerteza de medição” significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição, de modo que o resultado da medição é considerada a melhor estimativa do valor do mensurado. O Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012) define incerteza de medição como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

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

2.4.1 Método proposto no GUM

Para a avaliação da incerteza, o guia conceitua três tipos de incerteza: a padrão, a padrão combinada e a expandida. A incerteza padrão está relacionada a cada grandeza de influência e é obtida através da análise individual de cada variável considerada, através de uma avaliação do tipo A ou do tipo B. Feito isso e conhecendo-se o efeito dessas variáveis, é possível correlacioná-las por meio da lei de propagação de incertezas obtendo-se assim, a incerteza padrão combinada. Já a incerteza expandida é o resultado da multiplicação do valor da incerteza

padrão combinada por um fator de abrangência (k), definido de acordo com o nível de abrangência ou confiança desejado.

Este guia também detalha o passo a passo para o cálculo da incerteza de medição. Inicialmente, para a aplicação da metodologia proposta, é necessário definir a variável de saída, o sistema de medição e identificar as variáveis que podem influenciar o resultado da medição (variáveis de entrada).

A seguir, deve-se formular um modelo matemático que relaciona todas essas variáveis de entrada com o valor que se deseja determinar. Considerando Y como o mensurando em análise e x_i sendo as N variáveis de entrada, com i variando de 1 a N , pode-se relacionar essas variáveis conforme a Eq. (2.7).

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

Em seguida, são calculadas as incertezas padrão relativas à cada variável de entrada e para tanto pode-se efetuar uma avaliação tipo A ou tipo B.

A avaliação tipo A da incerteza-padrão é aquela obtida a partir de uma função densidade de probabilidade derivada de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando. Esta incerteza pode assumir uma distribuição normal (Fig. 2.25) ou outra qualquer como a *T-Student*. Como exemplo de variável cuja incerteza pode ser determinada por meio de uma avaliação do tipo A, está a variabilidade das leituras, cuja incerteza padrão é calculada via Eq. (2.8), em que s representa o desvio padrão experimental e n o número de elementos da amostra. Caso o número de leituras seja maior ou igual a 30 é adotada uma distribuição normal e caso seja menor adota-se uma distribuição *T-Student*, ambas para $n-1$ graus de liberdade.

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

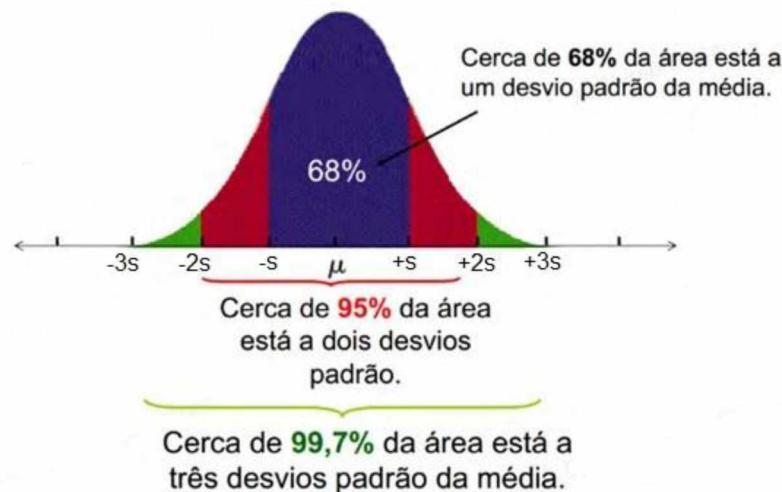


Figura 2.25 – Representação de uma distribuição normal (CAIRE, 2013).

Por outro lado, a avaliação tipo B da incerteza-padrão pode ser determinada por informações de manuais, especificações de fabricantes, certificados de calibração ou a partir de experiências anteriores. Dependendo da qualidade e quantidade de informação disponível, a forma de cálculo da incerteza de medição pode variar.

Para muitos casos, no certificado de calibração do instrumento de medição, é possível encontrar declarado que a incerteza citada define um intervalo tendo um nível da confiança de 90%, 95% ou 99%, de modo que caso não seja especificada uma distribuição, adota-se a normal. Assim, basta dividir a incerteza expandida declarada $U(x)$ pelo fator apropriado k conforme Eq. (2.9).

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (2.9)$$

Em outros casos, considerando como exemplo a resolução do instrumento R , é possível estimar apenas os limites superior e inferior para a variável de entrada e estabelecer que a probabilidade de que o valor desta variável pertença a um intervalo qualquer, como (a^-, a^+) , é igual a um e a probabilidade para que o valor esteja fora desse intervalo é igual a zero. Para tais situações deve ser utilizada a distribuição retangular ou uniforme, cuja representação se encontra na Fig. 2.26, e o cálculo da sua incerteza padrão pode ser efetuado por meio da Eq. (2.10).

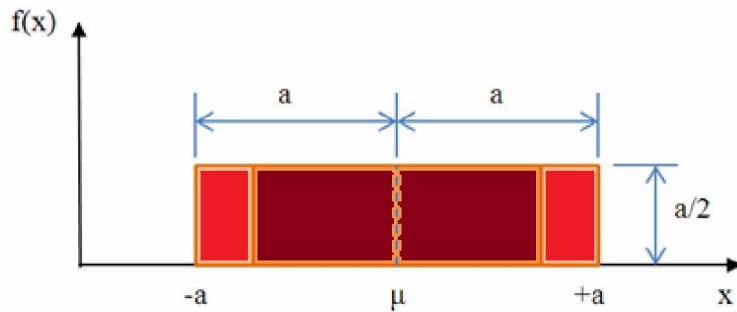


Figura 2.26 – Distribuição retangular (BIPM et al., 2008).

$$u(x) = \frac{\text{valor da grandeza}}{\sqrt{3}} \Rightarrow u(R) = \frac{R}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

No caso específico da resolução, destaca-se que se o instrumento for digital, o denominador da Eq. (2.10) deve ser multiplicado por dois. O uso da distribuição retangular é recomendado quando se dispõe de pouca informação sobre uma determinada variável.

Vale destacar que em casos menos comuns, é mais realista esperar que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio, de modo então que faz se necessário o uso de uma distribuição trapezoidal simétrica, Fig. 2.27.

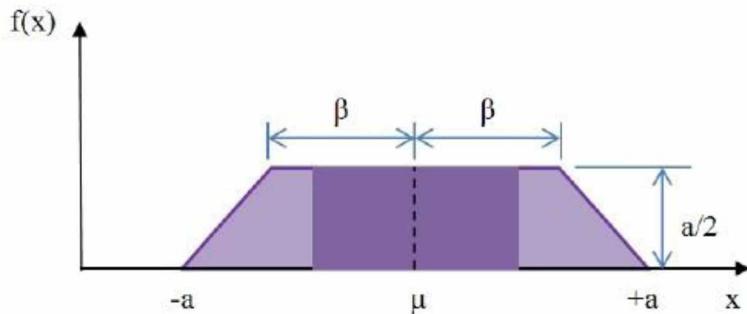


Figura 2.27 – Distribuição trapezoidal (BIPM et al., 2008).

Havendo mais conhecimentos sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, a distribuição de probabilidade assume a forma triangular, Fig. 2.28, com infinitos graus de liberdade, que pode evoluir para uma normal. A Eq. (2.11) indica o cálculo da incerteza padrão para o caso de distribuição triangular.

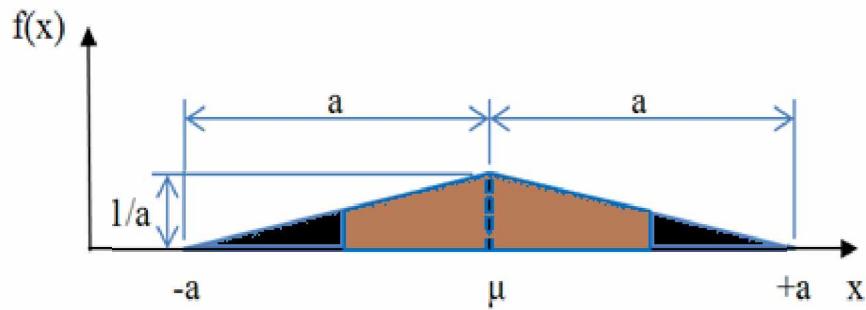


Figura 2.28 – Distribuição triangular (BIPM et al., 2008).

$$u(x) = \frac{\text{valor da grandeza}}{\sqrt{6}} \quad (2.11)$$

Calculadas as incertezas padrão das variáveis de entrada, deve-se determinar a incerteza padrão combinada. Para tal, o ISO/TAG 4/WG 3 (2008) divide as grandezas de entrada em dois casos: quando as grandezas de entrada não são correlacionadas e quando elas são correlacionadas.

Para o caso em que as grandezas de entrada são independentes tem-se que a incerteza padrão combinada de uma estimativa Y é representada por $u_c(Y)$, de modo que o quadrado da incerteza padrão combinada é dada pela Eq. (2.12) e expressa a lei de propagação de incerteza, aproximada pela série de Taylor de primeira ordem.

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

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

Já no caso em que as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão para a incerteza padrão combinada associada com o resultado de uma medição é dada pela Eq. (2.13).

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

Onde x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j . O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado pela Eq. (2.14), que é nulo quando as variáveis são independentes.

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

As derivadas parciais $\partial f / \partial x_i$ são denominadas coeficientes de sensibilidade c_i , e descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das variáveis de entrada x_i .

Por fim, a incerteza expandida, U , é obtida, multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , como mostrado na Eq. (2.15).

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

Este fator de abrangência presente na Eq. (2.15) é escolhido em função do nível de confiança especificado para o intervalo, permanecendo, em geral entre 2,00 e 3,00 para uma distribuição normal de probabilidade. Quando o número de leituras for reduzido ($n < 30$), deve ser utilizado o teorema do valor central juntamente com a tabela *T-student* para fornecer um valor para k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição. Esse cálculo é baseado na equação de *Welch-Satterwaite*, conforme expresso na Eq. (2.16).

$$v_{\text{efetivo}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u_i(x) \cdot c_i)^4}{v_i}} \quad (2.16)$$

De acordo com BIPM et al. (2008), o resultado de uma medição é então convenientemente expresso conforme a Eq. (2.17), em que \bar{y} corresponde à estimativa de Y , especificadamente, seu valor médio.

$$Y = \bar{y} \pm U(Y) \quad (2.17)$$

2.4.2 Método de Monte Carlo (MC)

De acordo com o INMETRO (2008), a metodologia de cálculo proposta no GUM para avaliação da incerteza de medição apresenta certas limitações, tais como: linearização do

modelo, suposição de distribuição normal para o mensurando e dificuldade de cálculo das derivadas parciais na determinação da incerteza padrão combinada e dos graus de liberdade efetivos. Desta forma, como uma alternativa para a avaliação da incerteza de medição, o método de simulação de MC pode ser aplicado.

Trata-se de um método numérico para a solução de problemas matemáticos por meio da simulação de variáveis aleatórias. Ou seja, é um método numérico universal para resolver problemas nos quais são inviáveis soluções analíticas, por meio de amostragem aleatória combinando distribuições, de forma a obter aproximações numéricas de funções complexas (INMETRO, 2008).

O método de Monte Carlo pode ser dividido nas seguintes etapas: definição do mensurando; elaboração do diagrama causa-efeito; estimativas das incertezas padrão das fontes de entrada; identificação das funções densidade de probabilidade (FDP), correspondentes a cada fonte de entrada; seleção do número de iterações de MC; geração dos números aleatórios; identificação da função densidade de probabilidade do mensurando ou variável de saída Y ; e estimativa da incerteza expandida.

Inicialmente, os métodos GUM e Monte Carlo seguem praticamente as mesmas etapas. Já relacionado à identificação das funções densidade de probabilidade referentes a cada fonte de entrada, cada FDP tem um intervalo no qual seu limite inferior é definido pelo valor mais provável da fonte subtraído da sua respectiva incerteza estimada, e seu limite superior é determinado pela soma destas mesmas grandezas.

A propagação das FDP das variáveis de entrada X_i através do modelo consiste na obtenção da FDP da variável de saída Y . Para tanto, em primeiro plano, determina-se o número de simulações a ser efetuado para obter resultados consistentes. A cada número aleatório gerado que esteja compreendido no intervalo da função densidade de probabilidade definida de cada fonte, imediatamente é realizado o cálculo do mensurando, através da sua equação de definição. Ao final do número de iterações, são obtidos tantos valores da variável de saída quanto a quantidade de números que estavam contidos nos intervalos das FDP de cada fonte. Desta forma, é possível efetuar o cálculo da média e do desvio-padrão de todos os valores obtidos para o mensurando (INMETRO, 2008).

O esquema das etapas para a aplicação do método de MC, de forma resumida, pode ser visualizado na Fig. 2.29.

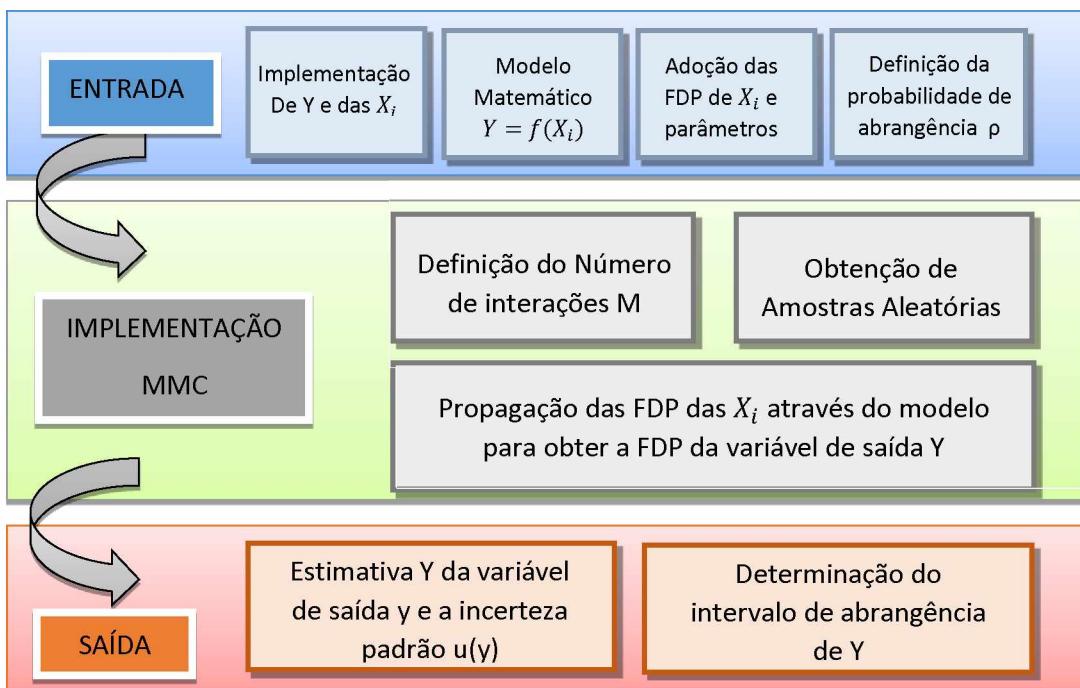


Figura 2.29 - Resumo das etapas para aplicação do método de MC (BIPM et al., 2008).

O modelo matemático proposto é avaliado para cada um dos M valores retirados das FDP das X_i variáveis de entrada. Especificamente, devem-se denotar os M valores por x_1, \dots, x_M , onde a posição de número r , dada por x_r contém $x_{1,r}, \dots, x_{N,r}$, com $x_{i,r}$ retirado da FDP de X_i . Então, os valores do modelo são dados pela Eq. (2.18):

$$y_r = f(x_r), r = 1, \dots, M \quad (2.18)$$

A representação discreta da distribuição da função da variável de saída Y pode ser obtida por meio, primeiramente, da classificação dos valores do modelo $y_r, r = 1, \dots, M$, fornecidos pelo método de MC em ordem crescente. Denotam-se os valores classificados do modelo por $y(r), r = 1, \dots, M$. Pode-se realizar, se necessário, pequenas perturbações numéricas para qualquer valor replicado do modelo y_r de modo que o resultado do conjunto de $y(r), r = 1, \dots, M$, forme uma sequência estritamente crescente.

Posteriormente, toma-se a FDP da variável de saída como o conjunto $y(r), r = 1, \dots, M$. A função $y(r)$, quando na forma de um histograma e com largura de classes adequada, forma uma distribuição de frequências que, quando normalizada para ter área unitária, fornece uma aproximação da FDP de Y . Este histograma pode ser útil auxiliando na compreensão da natureza da FDP, como na extensão da sua assimetria.

A média da variável de saída y é dada pela Eq. (2.19), enquanto que o desvio-padrão $u(y)$ é determinado pela Eq. (2.20):

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

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \bar{y})^2} \quad (2.20)$$

A média é considerada como uma estimativa y de Y e o desvio-padrão representa a incerteza-padrão $u(y)$ associada a y . O intervalo de abrangência para Y pode ser determinado a partir da representação discreta da FDP. A seguir deve-se determinar o valor de q pela Eq. (2.21), onde p representa a probabilidade e M o número de iterações.

$$q = pM \quad (2.21)$$

A Equação (2.21) é válida apenas quando q for um número inteiro. Caso contrário, q é determinado pela Eq. (2.22).

$$q = pM + \frac{1}{2} \quad (2.22)$$

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

Existem vários *softwares* que podem ser usados para realizar a Simulação de Monte Carlo, como o programa Microsoft Excel para a execução dos cálculos.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as etapas experimentais para alcançar o objetivo proposto nesta pesquisa, qual seja o de comparar o efeito do método de medição com contato e sem contato da rugosidade nos valores dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_v , R_p , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}), frequentemente, usados na indústria durante o controle geométrico das peças usinadas.

Os experimentos foram divididos em cinco etapas: planejamento dos experimentos, fabricação das amostras, medição da rugosidade, avaliação da incerteza de medição e análise estatística.

3.1 Planejamento experimental

Para comparar o efeito do método de medição com contato e sem contato da rugosidade nos valores dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_v , R_p , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}), foram fabricadas 72 amostras conforme planejamento fatorial completo $3 \times 2 \times 2 \times 2$, Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Matriz de planejamento fatorial completo 3x2x2x2.

Experimento	Fator 1 Material	Fator 2 Processo de usinagem	Fator 3 Profundidade de corte (mm)	Fator 4 Avanço (mm/rot)
1	-1 (Al)	-1 (T)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
2	-1 (Al)	-1 (T)	-1 (0,5)	1 (0,2)
3	-1 (Al)	-1 (T)	1 (1,0)	-1 (0,1)
4	-1 (Al)	-1 (T)	1 (1,0)	1 (0,2)
5	-1 (Al)	0 (F)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
6	-1 (Al)	0 (F)	-1 (0,5)	1 (0,2)
7	-1 (Al)	0 (F)	1 (1,0)	-1 (0,1)
8	-1 (Al)	0 (F)	1 (1,0)	1 (0,2)
9	0 (FF)	-1 (T)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
10	0 (FF)	-1 (T)	-1 (0,5)	1 (0,2)
11	0 (FF)	-1 (T)	1 (1,0)	-1 (0,1)
12	0 (FF)	-1 (T)	1 (1,0)	1 (0,2)
13	0 (FF)	0 (F)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
14	0 (FF)	0 (F)	-1 (0,5)	1 (0,2)
15	0 (FF)	0 (F)	1 (1,0)	-1 (0,1)
16	0 (FF)	0 (F)	1 (1,0)	1 (0,2)
17	1 (AC)	-1 (T)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
18	1 (AC)	-1 (T)	-1 (0,5)	1 (0,2)
19	1 (AC)	-1 (T)	1 (1,0)	-1 (0,1)
20	1 (AC)	-1 (T)	1 (1,0)	1 (0,2)
21	1 (AC)	0 (F)	-1 (0,5)	-1 (0,1)
22	1 (AC)	0 (F)	-1 (0,5)	1 (0,2)
23	1 (AC)	0 (F)	1 (1,0)	-1 (0,1)
24	1 (AC)	0 (F)	1 (1,0)	1 (0,2)

De acordo com a Tabela 3.1 foram fabricadas 24 amostras. Para cada teste, foram feitas uma réplica e uma tréplica, totalizando 72 amostras. Durante a fabricação das mesmas foram variados os seguintes parâmetros: material das amostras; processo de usinagem; avanço (*f*); e profundidade de corte (*ap*).

A variável material das amostras foi investigada em três níveis: alumínio comercial (Al), ferro fundido cinzento (FF) e aço carbono SAE 1020 (AC); o processo de usinagem em dois níveis: torneamento de faceamento (T) e fresamento de topo (F); o avanço em dois níveis: 0,1 mm/rotação e 0,2 mm/rotação; e a profundidade de corte em dois níveis: 0,5 mm e 1,0 mm.

3.2 Fabricação das amostras

As amostras foram fabricadas da seguinte forma: foram cedidos inicialmente doze blocos cilíndricos pelo Laboratório de Usinagem Convencional da Universidade Federal de Uberlândia, sendo quatro de alumínio comercial (Al), quatro de ferro fundido cinzento (FF) e quatro de aço carbono SAE 1020 (AC), com formato cilíndrico de diâmetro 50 mm por 90 mm de altura.

O primeiro processo de usinagem realizado foi o de torneamento, em função da necessidade de uma maior área das amostras para fixação na máquina.

A operação de torneamento foi realizada no Laboratório de Usinagem Convencional da Universidade Federal de Uberlândia, utilizando um torno CNC, modelo Multiplic 35D de fabricante ROMI, com distância entre pontas de 1500 mm e rotação máxima de 3000 rpm. A ferramenta de corte utilizada foi uma pastilha quadrada de metal duro ISO SPUN 12 03 08 H1P, com suporte para facear a 75° modelo CSKPR 2525 M12, Fig. 3.1.



Figura 3.1 - Ferramenta de corte para o torneamento: pastilha quadrada de metal duro ISO SPUN 12 03 08 H1P e suporte para facear a 75° modelo CSKPR 2525 M12.

A velocidade de corte foi mantida constante durante todo o processo de torneamento e foi adotada como 80 m/min em todos os casos analisados. Neste caso específico, o faceamento da superfície foi realizado até a distância de 5 mm do centro da amostra (circunferência de diâmetro igual a 10 mm). Tal procedimento é aconselhável em função das altas forças de usinagem obtidas quando se usina até o centro da peça utilizando-se da potência máxima da máquina-ferramenta.

Os doze blocos cilíndricos iniciais foram torneados. Após o processo de faceamento, realizado com as condições de corte de acordo com as especificações contidas na Tab. 3.1, foram retirados pequenos discos, com espessura aproximada de 5 mm, com uma serra elétrica, contendo a superfície torneada. Em seguida, foram produzidas a réplica e a tréplica dos experimentos. Dessa forma, foram obtidas 36 amostras torneadas, as quais foram identificadas e armazenadas para posterior análise da qualidade superficial.

O processo seguinte, fresamento de topo, foi executado com as mesmas condições e procedimentos para obtenção das amostras do processo de torneamento nos blocos cilíndricos restantes, mantida a velocidade de corte constante. Porém, ao contrário do torneamento, este processo foi realizado com uma fresa frontal para faceamento com cinco pastilhas. Por sua vez, foram obtidas mais 36 amostras, com superfícies fresadas, que também foram identificadas e armazenadas.

Assim, a operação de fresamento foi realizada no Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia, utilizando um centro de usinagem CNC, modelo Discovery 760 de fabricante Romi, Fig. 3.4, cuja potência do motor principal é 12,5 CV, com rotação máxima de 7500 rpm. Esta máquina apresenta cursos dos eixos *X*, *Y* e *Z* igual a 760 mm, 406 mm e 508 mm, respectivamente, dimensões da mesa de 915 mm de largura e 360 mm de comprimento e, avanços rápidos de 30 m/min para os eixos *X* e *Y* e de 20 m/min para o eixo *Z*. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa frontal para faceamento Sandvik código R290 - 063QZ2 - 12M, diâmetro de 63 mm, com cinco pastilhas quadradas de metal duro CoroMill 290 M, Fig. 3.2.



Figura 3.2 - Ferramenta de corte para o fresamento: fresa Sandvik R290 - 063QZ2 - 12M de diâmetro igual a 63 mm, com cinco pastilhas quadradas de metal duro CoroMill 290 M.

Em ambos os processos, foi utilizado fluido de corte de base vegetal Vasco 1000 emulsionável em água com concentração de 10%.

No total, foram obtidas 72 amostras, 36 com superfícies torneadas e 36 com superfícies fresadas, para a medição da rugosidade. A Figura 3.3 mostra as amostras 1 e 5, ambas de Al e obtidas pela mesma condição de corte ($f = 0,1 \text{ mm/rot}$ e $ap = 0,5 \text{ mm}$), através do processo de torneamento e fresamento, respectivamente, como exemplo.



Figura 3.3 - Amostras de alumínio resultantes dos processos de torneamento (amostra 1) e fresamento (amostra 5).

3.3 Medição da rugosidade

A medição da rugosidade foi executada utilizando um rugosímetro portátil Surtronic 3+, Fig. 3.4, do fabricante Taylor Hobson, modelo 112/1590, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e dois apalpadores: um apalpador com ponta de diamante com raio igual a $2 \mu\text{m}$ e outro com raio igual a $5 \mu\text{m}$, ambos de ponta com ângulo de cone igual a 60° , que podem ser visualizados na Fig. 3.5. Destaca-se ainda que os apalpadores utilizados do rugosímetro também possuíam 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 foi igual a 3 mm , diâmetro igual a 6 mm e sua distância até a ponta de diamante igual a 3 mm .



Figura 3.4 - Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson.



Figura 3.5 - Apalpadores de ponta com raio igual a 2 μm e 5 μm .

O rugosímetro eletromecânico possui certificado de calibração nº 0001/2016 (ANEXO I), emitido pelo Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Este certificado declara uma incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro de 0,02 μm para k igual a 2,23 e probabilidade de abrangência de 95%.

A medição da rugosidade das amostras foi realizada no LMD da UFU, no qual cada amostra foi medida cinco vezes, em locais diferentes. Durante a medição foram coletados e armazenados os valores dos seguintes parâmetros:

R_a (desvio aritmético médio do perfil);

R_q (desvio médio quadrático do perfil);

R_p (altura máxima do pico do perfil);

R_v (profundidade máxima do pico do perfil);

R_t (altura total do perfil);

R_{sk} (fator de assimetria do perfil - *Skewness*);

R_{ku} (fator de achatamento do perfil - *Kurtosis*).

O comprimento de amostragem L_e (*cut-off*), selecionado de acordo com a ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), foi de 0,8 mm para a maioria das peças. Em poucos casos, em que os valores de R_a foram maiores do que 2 μm , o valor do *cut-off* adotado foi de 2,5 mm. O filtro utilizado para a retirada das ondulações do perfil foi o Gaussiano. A direção de apalpação foi definida de acordo com a orientação dos sulcos presentes na superfície e a trajetória do apalpador foi perpendicular a eles.

A coleta dos dados foi realizada por meio do programa computacional *Talyprofile Gold 4.0*, fornecido pelo fabricante do respectivo rugosímetro, cuja interface gráfica pode ser visualizada na Fig. 3.6.

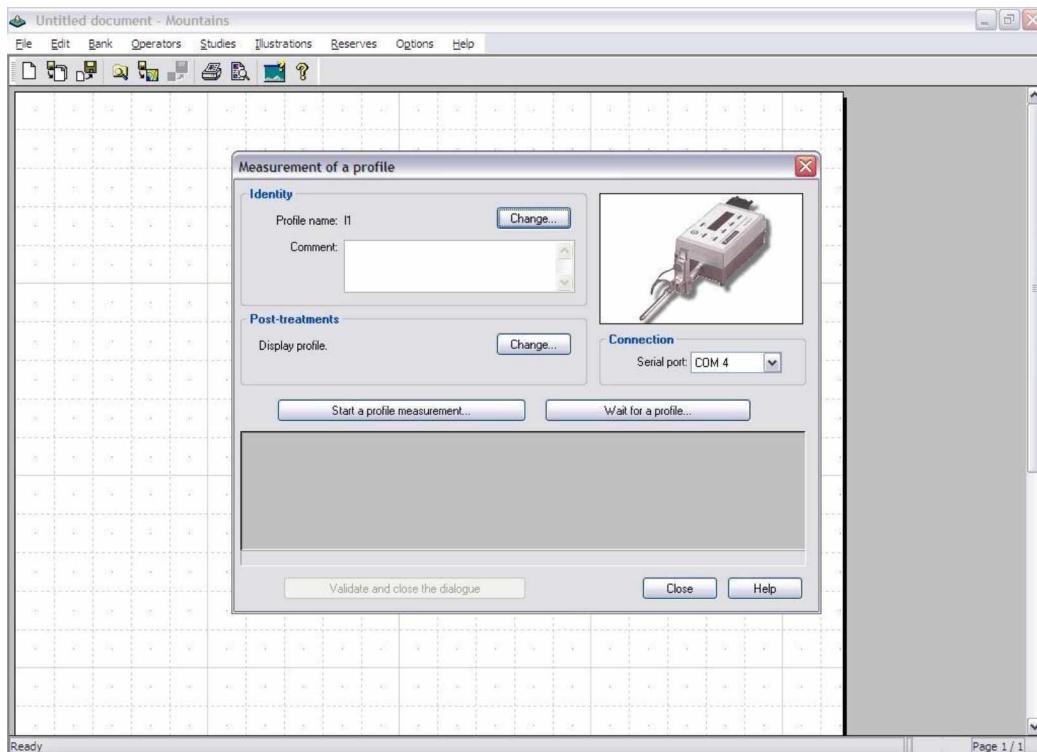


Figura 3.6 - Interface gráfica do programa computacional *Talyprofile Gold 4.0*.

O rugosímetro e as amostras objeto de medição foram posicionados em um desempeno de granito a fim de minimizar o efeito da vibração mecânica transmitida pelo solo. Este desempeno, de fabricante Mitutoyo, possui dimensões de 1000 mm de comprimento e

1000 mm de largura. No certificado de calibração do desempenho número 06994/13 (ANEXO II), a incerteza expandida declarada é de 2,9 μm para k igual a 2,25 e probabilidade de abrangência de 95%.

Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente de $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, de forma a atender a ABNT NM-ISO 1 (1997). Durante os experimentos a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e faixa nominal de (-20,0 a 60,0) $^\circ\text{C}$. O termo-higrômetro possui certificado de calibração N. R4996/13 e foi emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação (ANEXO III). Para a temperatura a incerteza expandida é de $0,3^\circ\text{C}$ para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade. Tanto as peças quanto os dispositivos e sistemas de medição foram deixados doze horas à temperatura padrão para atingirem o equilíbrio térmico. O rugosímetro foi ligado duas horas antes do início das medições.

Visando avaliar as diferenças encontradas entre diferentes métodos de medição da rugosidade e analisar a influência do tipo de medição adotado, as amostras também foram medidas por meio de um interferômetro modelo TALYSURF CLI 2000 fabricado pela Taylor Hobson, caracterizando a medição sem contato.

A incerteza expandida associada à calibração do interferômetro obtida por Magalhães (2013) é de $0,016\ \mu\text{m}$ para k igual a 2,16 e 17 graus de liberdade efetivos. A distribuição adotada foi a normal, para 95,45 % de probabilidade de abrangência. Este equipamento possui certificado de calibração (Anexo IV) que declara uma incerteza expandida associada à calibração para a medição com luz branca $0,30\ \mu\text{m}$. Este valor pode ser considerado expressivo e, portanto, não foi adotado neste trabalho.

Durante a medição foi utilizada luz branca, que permite medições com resolução de $0,01\ \mu\text{m}$. Foram efetuados cinco ciclos de medição para cada amostra avaliada, utilizando os mesmos comprimentos de amostragem, mesmo filtro no processamento dos dados e mesma condição ambiental definidos anteriormente na medição com contato.

A coleta de dados foi efetuada com o programa computacional *Talysurf CLI 2000*, cuja interface gráfica pode ser visualizada na Fig. 3.7.

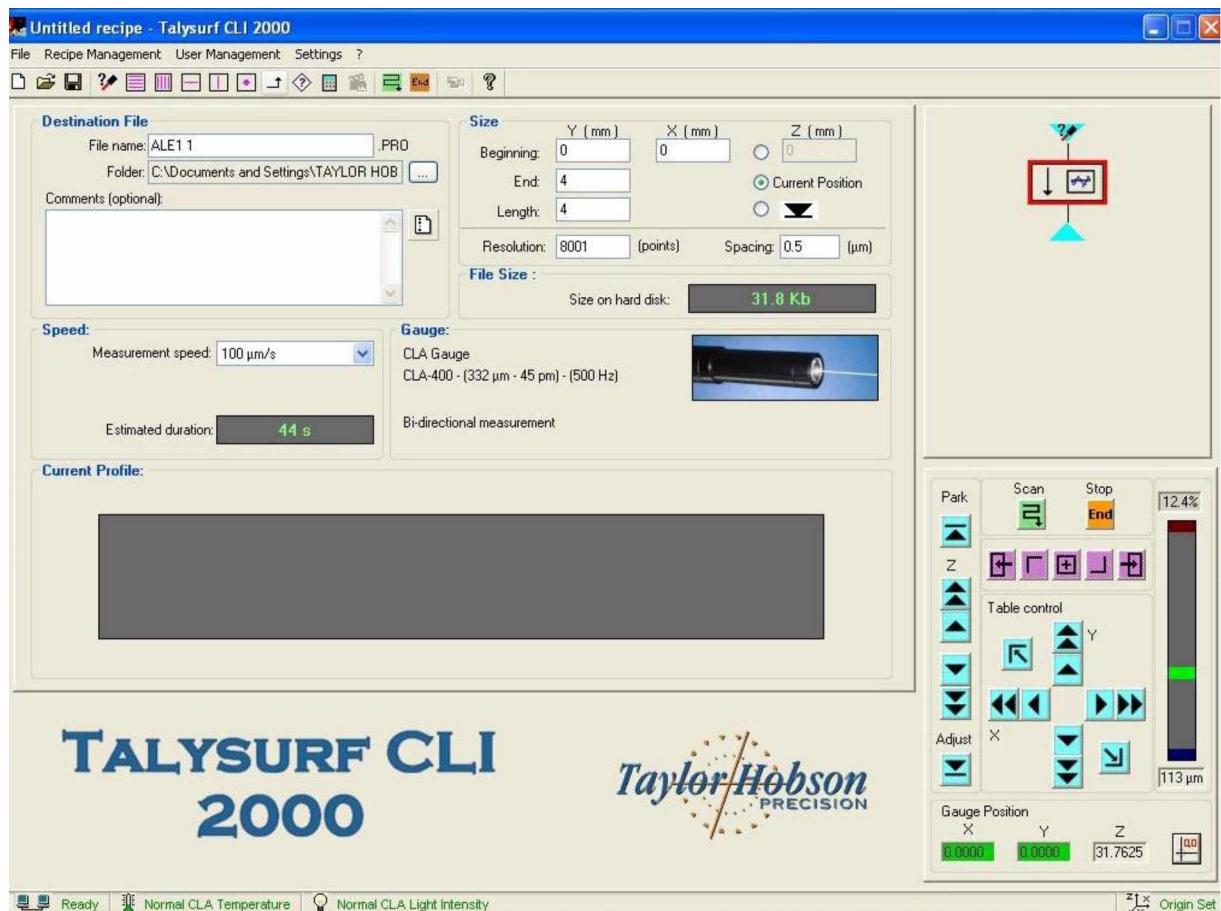


Figura 3.7 - Interface gráfica do programa *Talysurf CLI 2000*.

Com o auxílio do *Talysurf CLI 2000*, também foram adquiridas topografias das superfícies considerando uma área de 1,0 mm². Para a obtenção dessas topografias, foram determinados 2001 pontos em 1001 linhas, de modo que foi adotado um espaçamento de 1 μm entre as linhas, sendo o espaçamento entre os pontos de 0,5 μm. Foi realizado o nivelamento das amostras com o objetivo de eliminar o desvio de paralelismo entre as superfícies da amostra e aplicado o mesmo filtro para a obtenção dos perfis de rugosidade (Gaussiano) para eliminar as ondulações e demais desvios macrogeométricos.

3.4 Avaliação da incerteza de medição

De modo a avaliar a confiabilidade dos resultados e contribuir para a rastreabilidade dos mesmos, foi determinada a incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade analisados. Para os parâmetros de amplitude R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t foi utilizado o método proposto no guia

“Expressão da Incerteza de Medição – Avaliação de dados de medição” (INMETRO, 2012). Para os parâmetros de amplitude Rsk e Rku , em função da maior complexidade dos modelos matemáticos propostos, foi aplicado o método de Monte Carlo (MC).

Considerando a medição com contato, as variáveis de influência consideradas para o cálculo da incerteza de medição foram: variabilidade das leituras indicadas pelo rugosímetro; resolução do rugosímetro; incerteza associada à calibração do rugosímetro; raio da ponta do apalpador (BHUSHAN, 2000; CHAND et al., 2011); e deformação da amostra durante a medição (POON, BHUSHAN, 1995). A vibração mecânica decorrente das condições ambientais foi descartada uma vez que as medições foram realizadas sob uma mesa de desempeno, minimizando-se assim os efeitos da mesma. Os efeitos térmicos também foram desprezados uma vez que a medição foi efetuada à temperatura ambiente controlada ($20,0 \pm 1,0$) °C.

No caso da medição sem contato, foram consideradas as seguintes variáveis de influência: variabilidade das leituras indicadas pelo interferômetro; resolução do interferômetro; incerteza associada à calibração do interferômetro.

3.4.1 Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rv , Rp , Rz e Rt na medição com contato

O modelo matemático proposto para o cálculo da incerteza de medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rv , Rp , Rz e Rt na medição com contato é apresentado na Eq. (3.1), em que P_{Rug} representa o parâmetro de rugosidade medido.

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

Em que:

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

ΔR_{Rug} : correção associada à resolução do rugosímetro;

ΔIC_{Rug} : correção associada à incerteza de calibração do rugosímetro;

ΔA_R : correção associada ao raio da ponta do apalpador;

ΔD : correção associada à deformação do material durante a medição.

O próximo passo realizado foi o cálculo das incertezas-padrão de cada uma das variáveis de influência. Tal cálculo e as demais informações de tipo de avaliação da incerteza (TA), tipo de distribuição de probabilidades (DP), graus de liberdade (GL) e coeficiente de sensibilidade (CS) para cada variável na medição dos parâmetros de rugosidade especificados são apresentados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Dados adotados relacionados à avaliação da incerteza de medição com contato das amostras associada aos parâmetros R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t .

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

Na tabela 3.2, s representa o desvio padrão dos valores indicados pelo rugosímetro, n é o número de leituras, R_{Rug} é a resolução do instrumento e $U(IC_{Rug})$ representa a incerteza expandida da calibração do rugosímetro. Para o cálculo da incerteza-padrão relacionada ao raio da ponta do apalpador, foi adotado como referência o estudo de Haitjema (1998), que declara que a parcela de contribuição desta variável é da ordem de 2% do valor do parâmetro de rugosidade avaliado (P_{Rug}). Já o valor da deformação elástica experimentada pelos materiais das amostras durante a medição, neste trabalho, foi considerado como sendo igual a 20 nm (LEACH, 2001).

Obtida as incertezas-padrão de cada variável, a etapa seguinte consistiu na aplicação da Lei de Propagação de Incertezas, que permitiu calcular a incerteza-padrão combinada associada aos parâmetros em questão, via Eq. (3.2).

$$\begin{aligned} u_c^2(P_{Rug}) = & (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R_{Rug}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta IC_{Rug}) + \\ & + (1)^2 \cdot u^2(\Delta A_R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta D) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por fim, foi determinada a incerteza expandida através da multiplicação da incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência k específico.

3.4.2 Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t na medição sem contato

O modelo matemático adotado para a avaliação da incerteza na medição sem contato é semelhante ao determinado na medição com contato e é exibido na Eq. (3.3), em que P_{Rug} representa o parâmetro de rugosidade medido.

$$P_{Rug} = \bar{x}(L_{INT}) + \Delta R_{INT} + \Delta IC_{INT} \quad (3.3)$$

Em que:

$\bar{x}(L_{INT})$: média aritmética dos valores indicados pelo interferômetro;

ΔR_{INT} : correção associada à resolução do interferômetro;

ΔIC_{INT} : correção associada à incerteza de calibração do interferômetro.

O cálculo das incertezas-padrão de cada uma das variáveis de influência e demais especificações de TA, DP, GL e CS são apresentados na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 - Dados adotados relacionados à avaliação da incerteza de medição sem contato das amostras associada aos parâmetros R_a , R_q , R_v , R_p , R_z e R_t .

Grandeza	TA	DP	Incerteza-padrão	GL	CS
$\bar{x}(L_{INT})$	A	<i>T-student</i>	$u(\bar{x}(L_{INT})) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	$n-1$	1
ΔR_{INT}	B	Retangular	$u(\Delta R_{INT}) = \frac{R_{INT}}{2 \cdot \sqrt{3}}$	∞	1
ΔIC_{INT}	B	Normal	$u(\Delta IC_{INT}) = \frac{U(IC_{INT})}{k_{INT}}$	17	1

Os demais passos seguem a mesma linha dos realizados para a medição com contato, considerando as devidas adaptações em função da menor da quantidade de variáveis de influência e das informações relacionadas à mudança do instrumento de medição.

3.4.3 Incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade Rsk e Rku

O cálculo da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo tem os mesmos passos iniciais do método pelo GUM, que consiste na identificação das variáveis de influência, definição do modelo matemático e adoção do tipo de distribuição.

Para o Rsk (*Skewness*) e Rku (*Kurtosis*), as variáveis de influência consideradas são:

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

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

ΔRq : correção associada à incerteza de medição do parâmetro Rq ;

ΔZ : correção associada à incerteza de medição ordenada Z .

Os modelos matemáticos propostos para o cálculo das incertezas de medição associadas aos parâmetros em questão são descritos nas equações Eq. (3.4) e Eq. (3.5).

$$Rsk = \bar{x}(L_{Rsk}) + \left(\frac{1}{(\Delta Rq)^3} \right) \cdot (\Delta Z)^3 \quad (3.4)$$

$$Rku = \bar{x}(L_{Rku}) + \left(\frac{1}{(\Delta Rq)^4} \right) \cdot (\Delta Z)^4 \quad (3.5)$$

De modo a estimar o valor limite do número de simulações numéricas realizadas para a aplicação do método de Monte Carlo, considerou-se as seguintes condições: comportamento aproximadamente normal da FDP (função densidade de probabilidade) da variável de saída; coeficiente de assimetria (*Skewness*) próximo de zero; coeficiente de achatamento (*Kurtosis*) próximo de três; estabilidade dos valores da incerteza-padrão combinada.

Desta forma, utilizando o programa computacional da Microsoft Excel 2007, foram executadas 100 000 iterações, usando também como referência para a determinação da quantidade de iterações os trabalhos desenvolvidos por Piratelli-Filho e Di Giacomo (2003) e Leal (2013).

A escolha do Excel 2007 ocorreu devido às atualizações do programa, superando limitações de versões anteriores, como o aumento do número de linhas, que passou de 60 000 para 1 000 000, tornando-o útil para a geração de números aleatórios.

O programa conta com funções específicas para a geração de números aleatórios, porém a quantidade de números gerados é limitada, o que comprometeria a utilização dessas funções para a aplicação do MC. Assim, torna-se necessário utilizar de outras funções disponíveis no Excel (Tab. 3.4) para gerar vetores com os valores correspondentes a cada variável de entrada, de tal maneira que as distribuições de probabilidade consideradas foram as adotadas em cada caso.

Tabela 3.4 - Funções utilizadas para a simulação do MC (EXCEL, 2007).

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

Utilizando-se a função ALEATÓRIO (), foram gerados valores positivos entre zero e um, o que não é um intervalo de interesse para a aplicação do método. Assim, realizou-se, inicialmente, a multiplicação do número gerado pela incerteza padrão da variável analisada e, em seguida, efetuada uma perturbação, via Eq. (3.6), para que os valores simulados fiquem com esperança igual a zero como recomendado pelo INMETRO (2008).

$$\text{valor} = (\text{ALEATORIO} () \cdot u(x_i)) \cdot 2 - u(x_i) \quad (3.6)$$

Terminadas as simulações, cada vetor relativo à cada variável de entrada foi substituído nos modelos matemáticos correspondentes (tanto para a medição com contato quanto para a medição sem contato), resultando nos vetores de valores das variáveis de saída R_{sk} e R_{ku} .

É importante destacar que a diferença para o cálculo desses dois parâmetros para a medição com contato e sem contato está no modelo de cálculo da variável de influência ΔZ . Ao passo que na primeira, para o cálculo desta correção considerou-se como variáveis de entrada a resolução do rugosímetro, a incerteza de calibração do rugosímetro, o raio da ponta

do apalpador e a deformação do material durante a medição, no segundo, foram considerados a resolução do interferômetro e a incerteza de calibração do interferômetro.

Por fim, foi determinada a incerteza expandida como sendo duas vezes o desvio-padrão para $k = 2,00$ e uma probabilidade de abrangência de 95%, usualmente utilizada na maioria das aplicações de metrologia dimensional.

3.5 Análise estatística

A posterior análise dos resultados foi efetuada utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância, também conhecida como ANOVA, por meio do *software* Statistica 7.0, buscando identificar a influência do fator tipo de medição na produção de efeitos significativos nas variáveis de resposta.

Para tanto foi adotada a distribuição F (*Fischer-Snedecor*) onde p ou p -valor indica a probabilidade de que uma determinada variação na variável dependente seja observada no caso em que a variável independente não afeta a variável dependente. Para que os fatores considerados produzam efeitos significativos nos parâmetros de rugosidade, estes devem apresentar um valor de probabilidade de significância (p -valor) menor que 0,05 (nível de significância de 5%). Deste modo, pode-se concluir que existe uma relação linear entre a variável dependente (parâmetros de rugosidade analisados: R_a , R_q , R_v , R_p , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}) e a variável independente (tipo de medição adotado no caso medição sem e com contato).

Complementando essa análise, foi determinado também o valor de diferença entre os sistemas de medição interferômetro e rugosímetro, definido pela subtração entre os valores médios dos parâmetros obtidos pela medição com contato e os valores médio dos mesmos parâmetros obtidos pela medição sem contato das amostras analisadas. Tal valor indica a exatidão da medição com contato uma vez que a medição sem contato foi adotada como referência.

Assim como a exatidão, a precisão, associada ao desvio padrão das leituras, também foi avaliada por meio da repetibilidade dos valores encontrados.

Deste modo, tendo em posse os dados obtidos e as análises realizadas, objetivou-se a determinação de um fator de correção para a medição com contato em função da incapacidade da ponta, por menor que seja seu raio, de fornecer resultados de medição diferentes do “real”.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos relacionados à medição da rugosidade superficial das 72 amostras usinadas. Para todos os casos, é declarada a incerteza associada à medição.

4.1 Medição com contato utilizando diferentes raios de ponta

A medição com contato por meio da utilização de duas pontas com raios distintos, uma igual a 2 μm e outra igual a 5 μm , não provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios encontrados dos parâmetros de rugosidade considerados (R_a , R_q , R_p , R_v , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}) e, portanto, não foram avaliados. Os resultados médios obtidos em ambos os casos são exibidos no APÊNDICE I. Ainda, no APÊNDICE I, são exibidos os quadros de ANOVA completos para os parâmetros avaliados, comprovando que a ponta não provocou efeitos estatisticamente significativos nos resultados encontrados.

4.2 Medição com contato e sem com contato dos parâmetros de rugosidade

Os valores médios dos parâmetros de rugosidade avaliados obtidos na medição sem contato e com contato utilizando a ponta com raio igual a de 2 μm são mostrados a seguir.

O experimento E1 refere-se à condição $ap = 0,5 \text{ mm}$ e $f = 0,1 \text{ mm/rot}$; E2 à $ap = 0,5 \text{ mm}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; E3 à $ap = 1,0 \text{ mm}$ e $f = 0,1 \text{ mm/rot}$; e E4 à $ap = 1,0 \text{ mm}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$.

Estas informações são válidas para todos os gráficos que apresentam os valores médios dos parâmetros neste capítulo.

4.2.1 Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade (R_a)

Os valores médios de R_a são exibidos nas Figs 4.1 e 4.2, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente. As barras em cor cinza e branca mostram os valores resultantes da medição com contato e medição sem contato, respectivamente. São mostrados ainda os valores de incerteza expandida (95%) associados à medição como sendo a barra de erros.

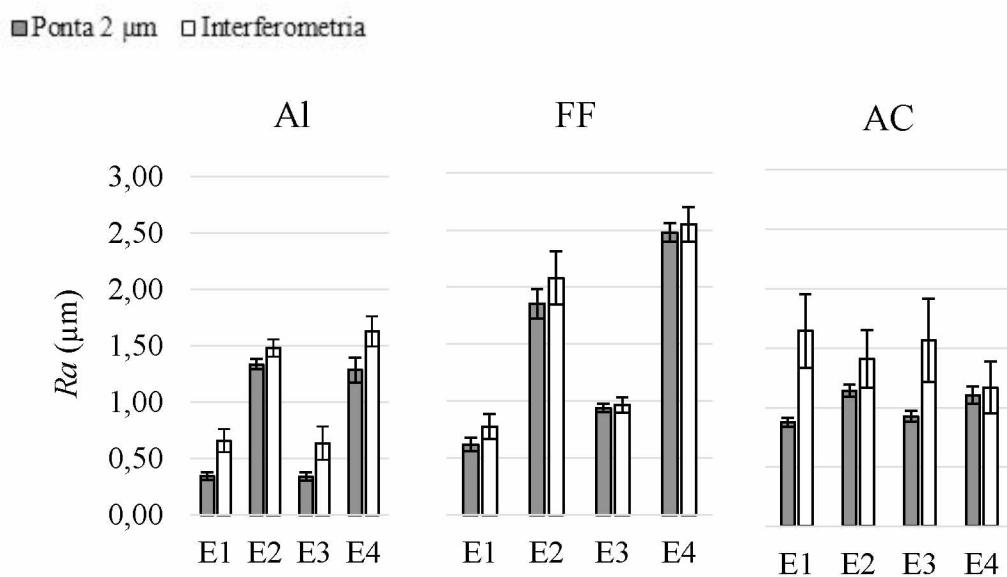


Figura 4.1 - Valores médios do parâmetro R_a para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

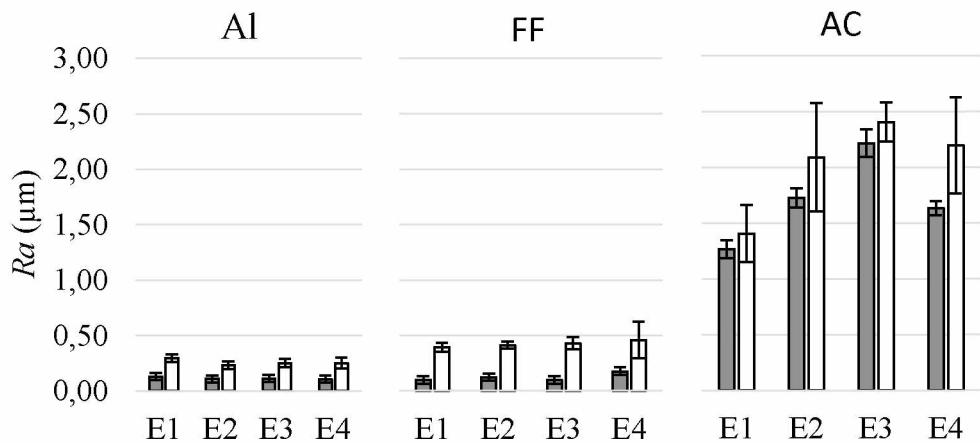


Figura 4.2 - Valores médios do parâmetro R_a para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

De acordo com as Figs. 4.1 e 4.2, a medição sem contato forneceu em todos os casos valores médios maiores do que a medição com contato para todas as condições investigadas. Este fato pode ser atribuído à impossibilidade na medição com contato em detectar as irregularidades que sejam menores do que o valor do raio da ponta.

As condições de corte, avanço e a profundidade, também influenciam significativamente os resultados os valores de R_a sendo que o avanço é mais influente. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas da ferramenta tendem a aumentar com o aumento do avanço (MACHADO, DA SILVA, 2004). O efeito deste parâmetro de corte pode ser visualizado nas topografias superficiais das amostras torneadas de Al e FF para as condições E1 e E2, Figs. 4.3 e 4.4, respectivamente.

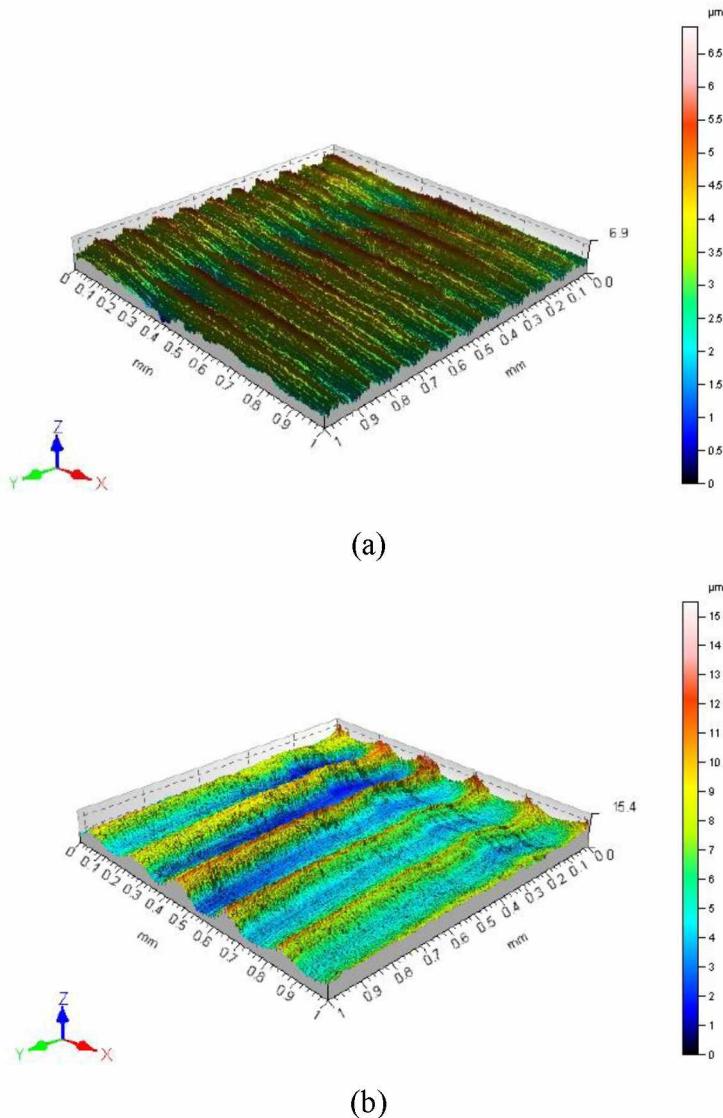


Figura 4.3 - Topografias superficiais de amostras torneadas de Al na condição E1 (a) e E2 (b) em 3D.

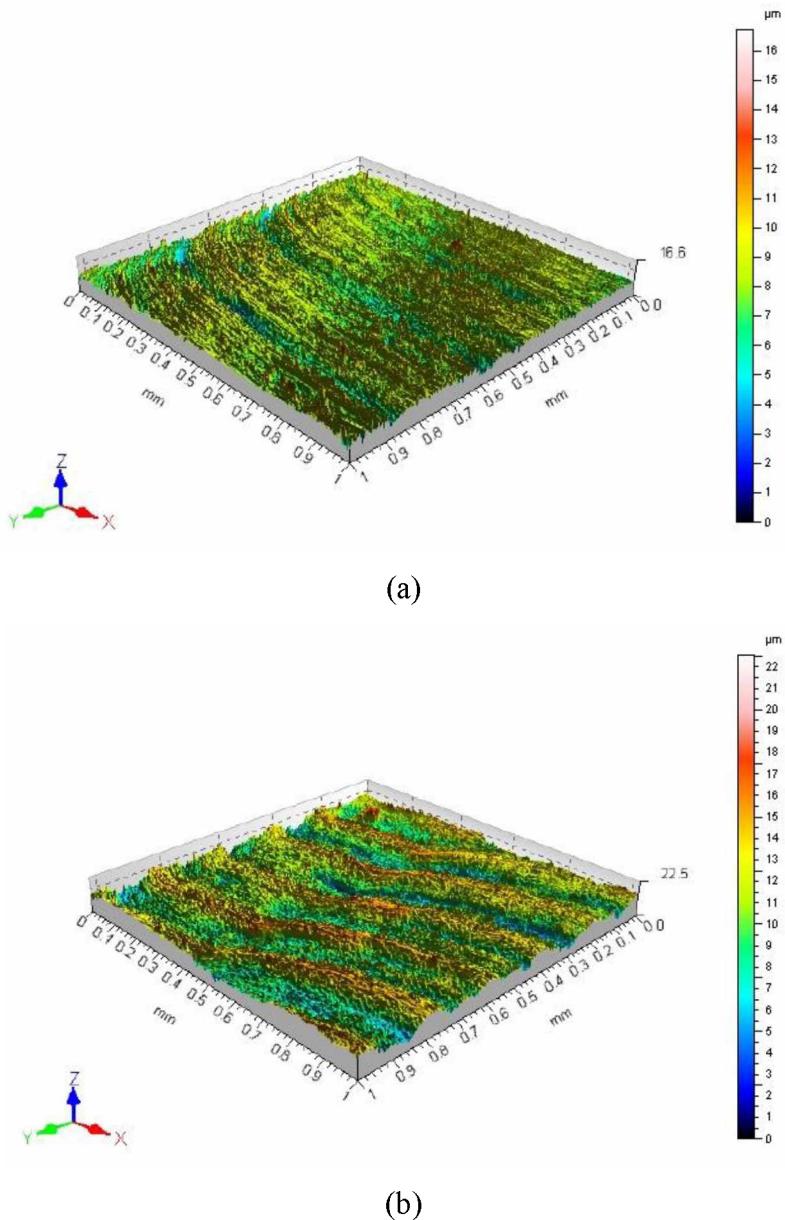


Figura 4.4 - Topografias superficiais de amostras torneadas de FF na condição E1 (a) e E2 (b) em 3D.

Nestas figuras, as diferentes cores evidenciam as diferenças entre as ordenadas dos pontos que definem a superfície efetiva, caracterizando os sulcos deixados pela ferramenta de corte como retilíneos e paralelos entre si. Pelas Figuras 4.3 e 4.4, é possível visualizar o efeito do aumento do avanço no acabamento da superfície e também a não homogeneidade deste.

O aumento da profundidade de corte leva ao aumento das forças de usinagem e, consequentemente, à vibração mecânica do sistema, que prejudica enormemente o acabamento superficial da peça. Porém, segundo Bonifácio (1983), não há influência marcante da

profundidade de corte para valores menores que 1 mm, como pode ser visualizado nas Figs. 4.1 e 4.2.

No torneamento (Fig. 4.1), os maiores valores de R_a foram encontrados para as amostras de FF. No ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiro comprime o material, e como as suas grafitas possuem lamelas afiadas, ocorre uma concentração de tensão nas suas extremidades. Com o avanço da ferramenta, o material é removido completamente com uma força de corte menor. Destaca-se que a ferramenta de corte não permanece sempre em contato com o material, pois uma porção desse é removida à frente da ferramenta, gerando crateras. A retirada de material acarreta consigo a também liberação da grafita presente em sua composição.

Ferraresi (1970) afirma que os ferros fundidos cinzentos contêm até 3% de silício, responsável por aumentar a quantidade de grafita, que atua como lubrificante sólido, fornecendo uma melhor usinabilidade perante as demais estruturas de ferro fundido. Porém, como a grafita é liberada no processo de corte, o acabamento da superfície usinada e, consequentemente, a rugosidade, pioram (COHEN et al., 2000; GEORGIOU, 2002). Por outro lado, a usinagem de FF, em função da porosidade do material, é caracterizada por fornecer cavacos descontínuos, no qual o cavaco rompe em pequenos segmentos em função da presença da grafita, produzindo uma descontinuidade da microestrutura e reduzindo a qualidade superficial.

Para o fresamento (Fig. 4.2), as amostras de AC exibiram maiores valores de R_a . A justificativa para este resultado está no fato de que no processo de fresamento, o AC, em função da sua maior dureza, sofre maiores vibrações durante a usinagem, visto a condição de corte intermitente quando comparada ao processo de torneamento, o que tende a aumentar a rugosidade superficial (MACHADO; DA SILVA, 2004).

A Figura 4.5 mostra o comportamento dos três diferentes materiais durante este processo para uma mesma condição de corte (E1). A amostra de AC apresentou maiores valores de rugosidade (pior acabamento superficial) diante das de Al e FF. Observa-se que a topografia da amostra de AC fresada (Fig. 4.5c) é significativamente diferente das de Al e FF, dado pelo formato do tipo platafórmico apresentado por esta superfície.

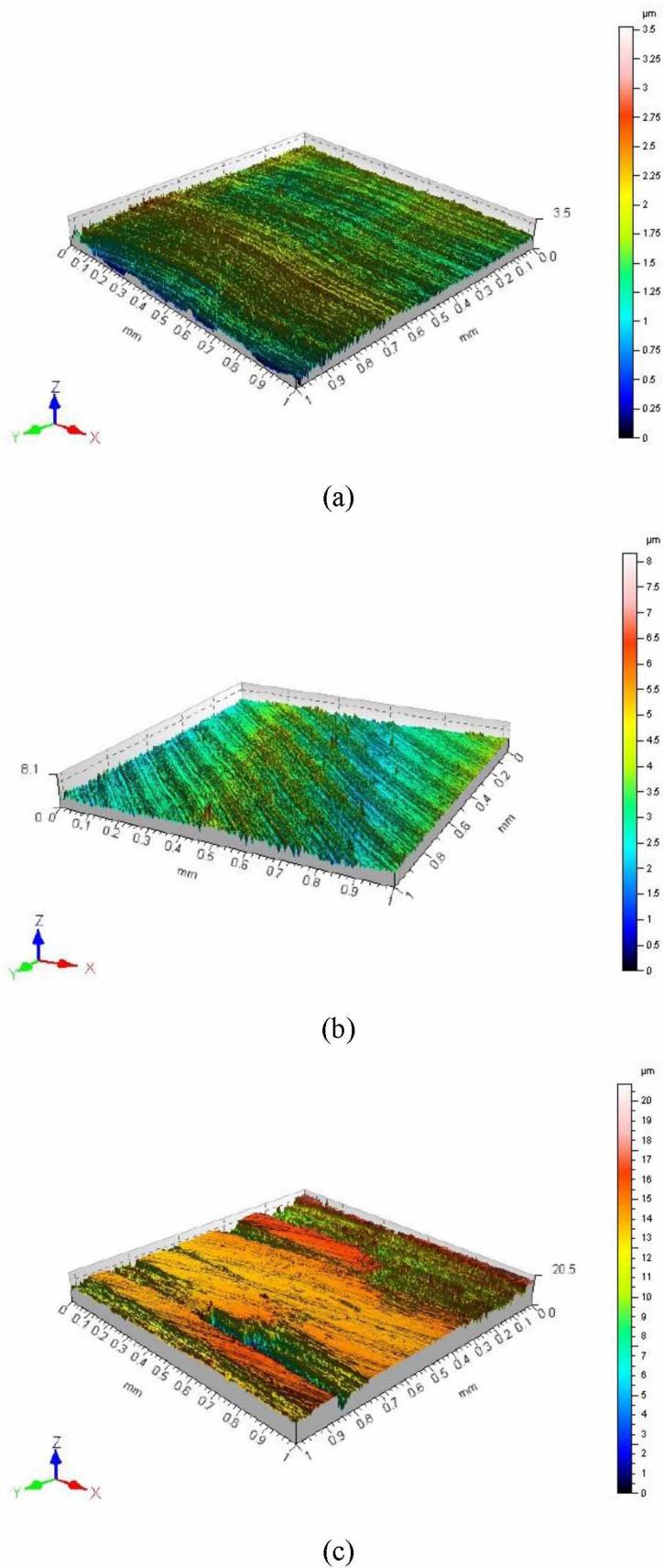


Figura 4.5 - Topografias superficiais das amostras fresadas de Al (a), FF (b) e AC (c) na condição E1 em 3D.

Com relação aos valores de incerteza expandida, a medição por interferometria apresentou valores maiores do que a medição com contato, resultado da menor repetibilidade das leituras na medição sem contato (maior desvio padrão).

Essa menor repetibilidade na medição por interferometria pode ser atribuída à reflexão da luz. Uma superfície idealmente lisa proporciona uma reflexão de luz bastante uniforme. Entretanto, quando a reflexão da luz acontece em superfícies rugosas, ocorre uma distorção da luz refletida, em função das irregularidades presentes neste tipo de superfície quando comparada com a “ideal”. Logo, superfícies geradas em situações com parâmetros de corte distintos, causam efeitos desiguais na luz refletida (MARCHIORI, 2013). Ainda, de acordo com Heitmann (1977), a intensidade absoluta refletida varia significativamente com a rugosidade da superfície. Deste modo a precisão na medição por interferometria varia significativamente com as mudanças no acabamento superficial. Pode-se acrescentar, ainda, que alterações microsuperficiais como microtrincas oriundas dos processos de usinagem, são capazes de influenciar o resultado da medição sem contato por ser um método de medição mais sensível.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a diferença entre as leituras médias obtidas por meio dos dois tipos de medição (sem contato e com contato) para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente. As barras de erros mostram o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

Os maiores valores de diferença foram observados para as amostras de AC, sendo o maior, em módulo, igual a 0,99 μm , de acordo com a referência adotada. Embora, em geral, os valores médios obtidos pela medição sem contato foram maiores do que na medição com contato, é possível notar que em algumas condições isto não aconteceu, fornecendo um valor positivo. O valor máximo da diferença foi de 0,25 μm para a amostra de AC fresada na condição E1.

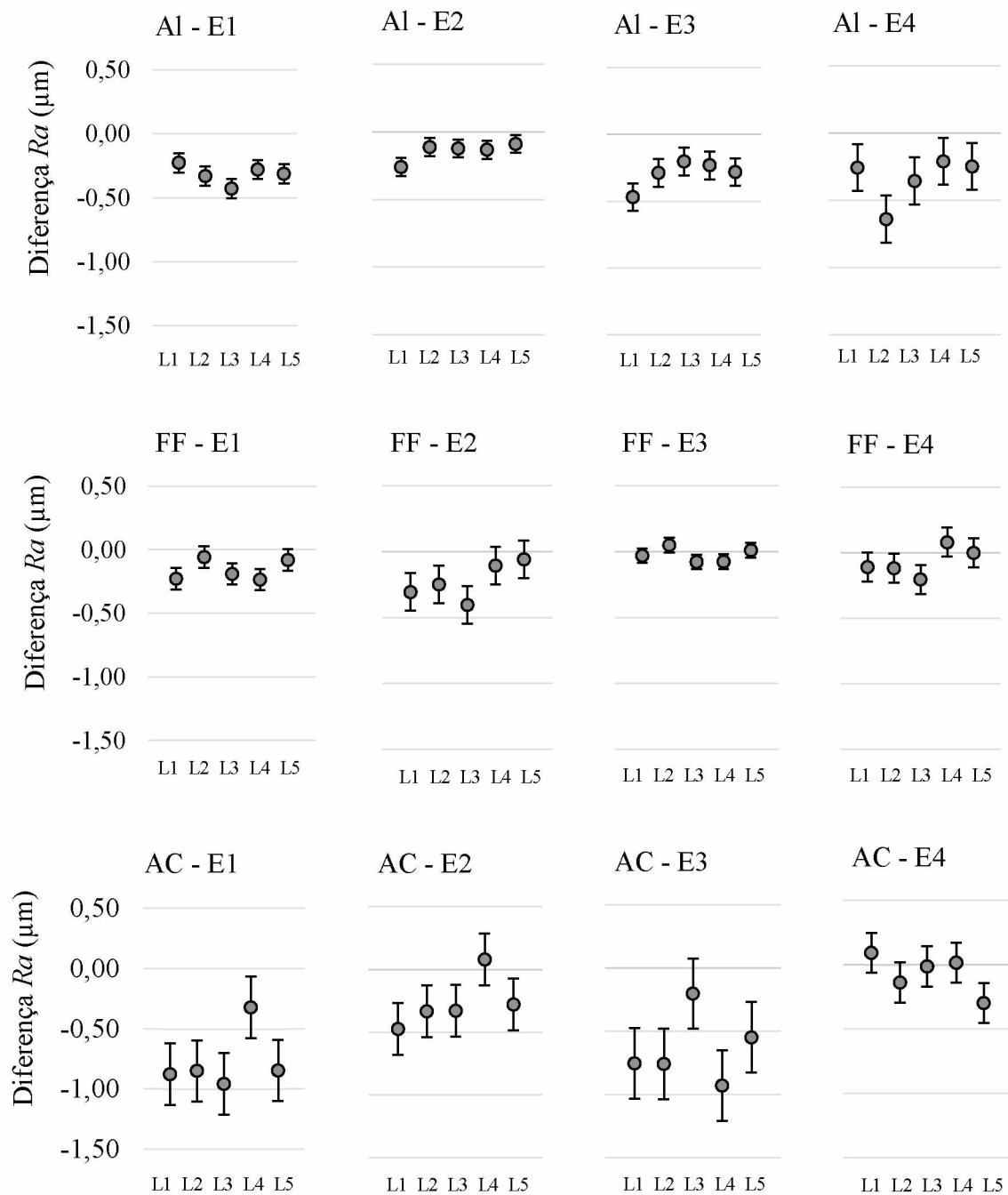


Figura 4.6 - Diferença associada à medição do R_a para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

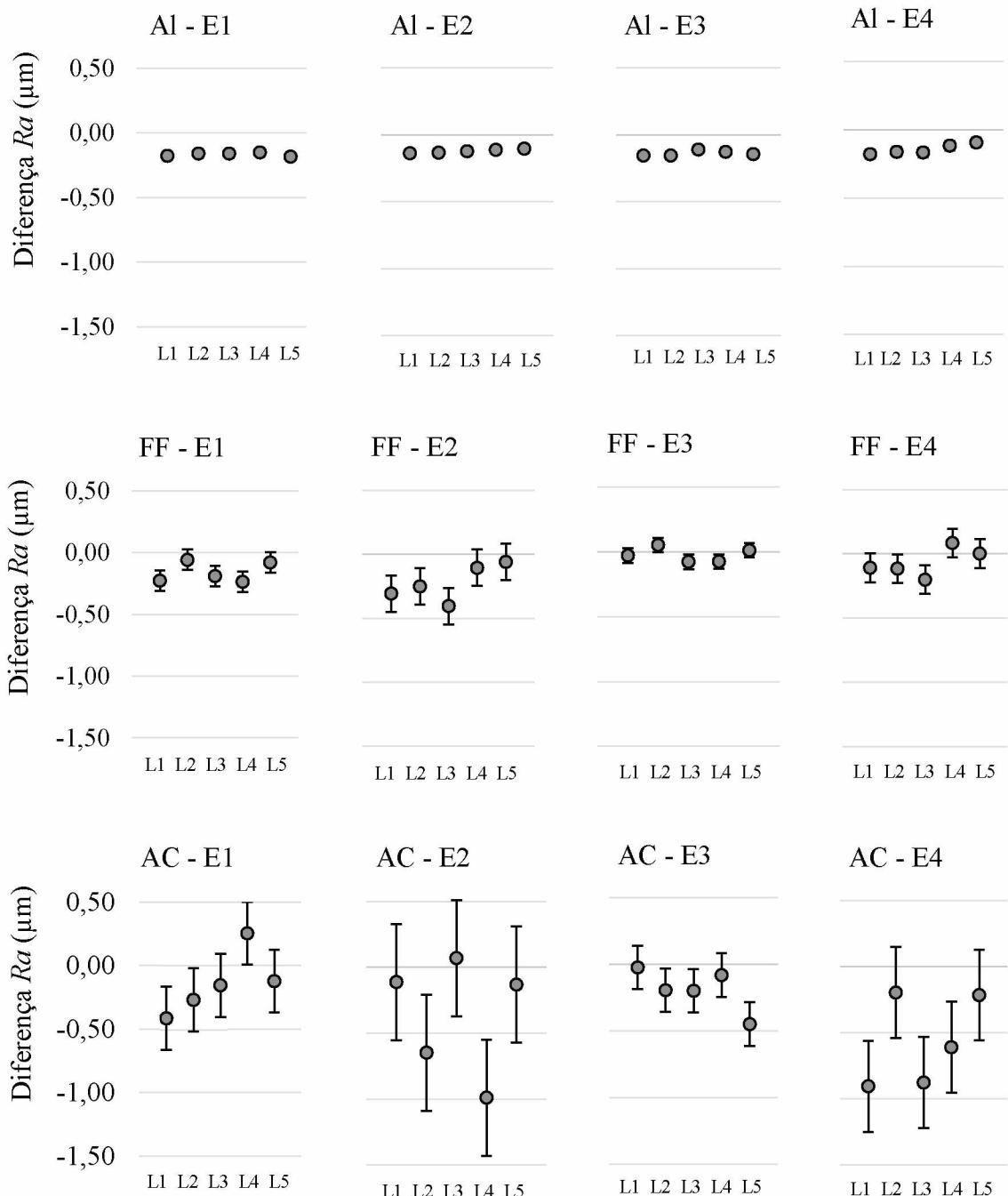


Figura 4.7 - Diferença associada à medição do R_a para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

Valores de diferença positivos podem ser atribuídos ao fato de que a medição com e sem contato foram efetuadas em regiões diferentes, assim sendo, alterações superficiais como incrustações de cavaco, poros e microtrincas, oriundas dos processos de usinagem (torneamento

e fresamento), são capazes de influenciar o resultado da medição. Desta forma, em função da região onde a medição foi efetuada, o resultado obtido apresentou-se contrário ao esperado.

Entretanto, quando considerados os valores médios para cada condição, em todos os casos, a medição com contato forneceu valores menores de R_a como mostram as Figs. 4.1 e 4.2.

Os altos valores de desvio padrão, mostrados por meio da barra de erros nas Figs. 4.6 e 4.7, indicam também a baixa repetibilidade dos valores diferença, resultante da baixa repetibilidade dos resultados obtidos na medição sem contato. Para as amostras de Al fresadas, a precisão dos resultados foi melhor.

A diferença percentual entre os valores médios obtidos pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.8 e 4.9, respectivamente.

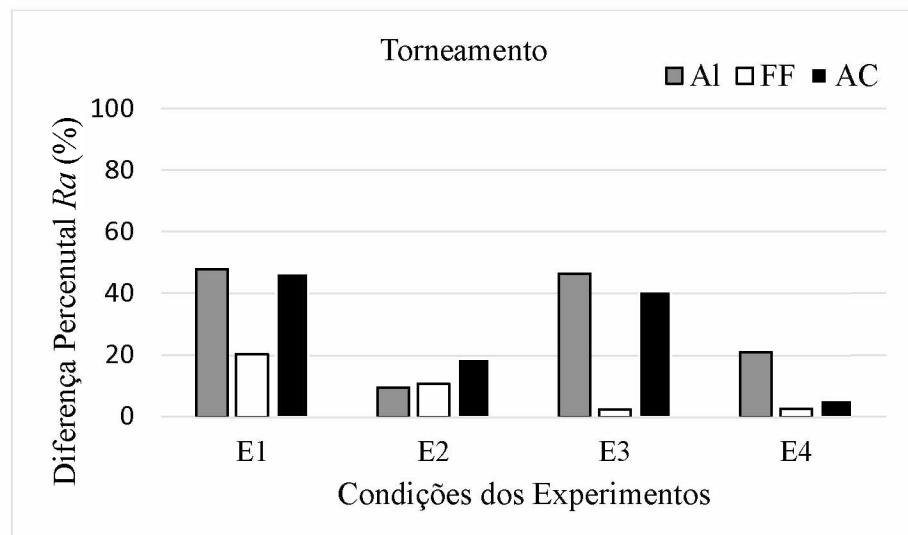


Figura 4.8 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_a para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

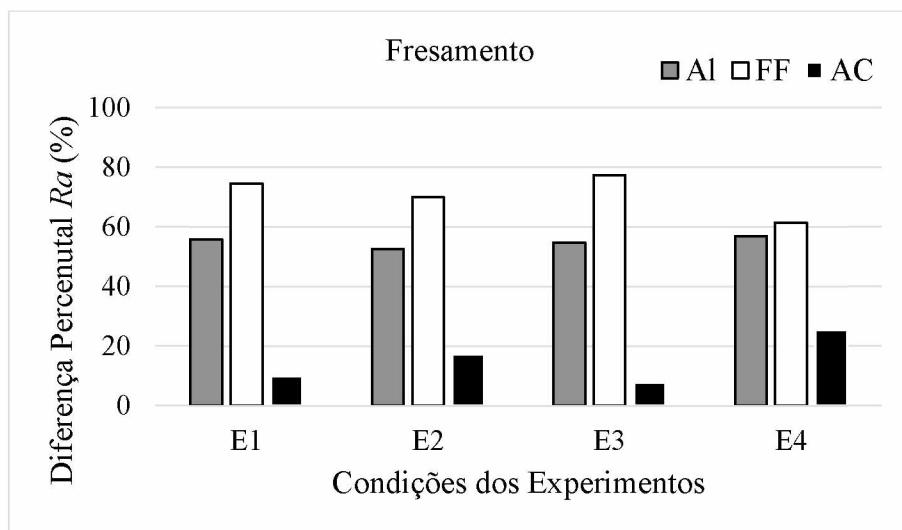


Figura 4.9 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_a para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram que os valores de diferença percentual foram influenciados pelos materiais avaliados, pelo processo de usinagem e pelas condições de corte, o torneamento em maior escala e o fresamento em menor escala.

Observa-se na Fig. 4.8 que para o processo de torneamento, as amostras de FF apresentaram menores diferenças percentuais. Por sua vez, o Al exibiu a maior diferença percentual para a maioria das condições investigadas. A elevada ductilidade do Al possibilita o aparecimento de danos significativos na superfície da peça durante a medição com contato como observado por Dobes et al. (2017).

Na Figura 4.9, tem-se um comportamento significativamente diferente dos três materiais, sendo que o FF apresentou o pior desempenho, enquanto que o AC exibiu o melhor. Nesta figura, observa-se, também, uma maior repetibilidade dos valores de diferença percentual para o fresamento quando comparado com o torneamento (para um mesmo material usinado com diferentes condições de corte).

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram os resultados obtidos na análise de variância, para as amostras de Al, FF e AC, em cada condição de corte especificada, considerando apenas o fator tipo de medição como variável independente, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente. Tem-se que: *Intercepto* corresponde à estimativa do parâmetro analisado (variável dependente) quando as variáveis independentes são nulas, *TM* ao tipo de medição utilizada (sem contato e com contato) e a última linha ao erro, representando a variação dentro das amostras.

Tabela 4.1 - ANOVA do parâmetro R_a de rugosidade para as amostras torneadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	6,257909	1	6,257909	1174,321	0,000000
	TM	1,241035	1	1,241035	232,885	0,000000
	Erro	0,149211	28	0,005329		
AI-E2	Intercepto	52,13478	1	52,13478	4548,169	0,000000
	TM	0,78343	1	0,78343	68,346	0,000000
	Erro	0,32096	28	0,01146		
AI-E3	Intercepto	6,049119	1	6,049119	814,9483	0,000000
	TM	1,064540	1	1,064540	143,4168	0,000000
	Erro	0,207836	28	0,007423		
AI-E4	Intercepto	57,75541	1	57,75541	4893,392	0,000000
	TM	1,73053	1	1,73053	146,621	0,000000
	Erro	0,33048	28	0,01180		
FF-E1	Intercepto	19,48223	1	19,48223	1152,201	0,000000
	TM	0,02490	1	0,02490	1,472	0,235095
	Erro	0,47344	28	0,01691		
FF-E2	Intercepto	115,6699	1	115,6699	5717,012	0,000000
	TM	0,4008	1	0,4008	19,809	0,000124
	Erro	0,5665	28	0,0202		
FF-E3	Intercepto	31,05400	1	31,05400	3408,428	0,000000
	TM	0,08296	1	0,08296	9,105	0,005380
	Erro	0,25511	28	0,00911		
FF-E4	Intercepto	155,6098	1	155,6098	2137,988	0,000000
	TM	2,2005	1	2,2005	30,233	0,000007
	Erro	2,0379	28	0,0728		
AC-E1	Intercepto	44,73539	1	44,73539	1550,352	0,000000
	TM	5,38833	1	5,38833	186,738	0,000000
	Erro	0,80794	28	0,02885		
AC-E2	Intercepto	49,56433	1	49,56433	3035,541	0,000000
	TM	0,44670	1	0,44670	27,358	0,000015
	Erro	0,45718	28	0,01633		
AC-E3	Intercepto	42,72174	1	42,72174	1162,127	0,000000
	TM	4,13678	1	4,13678	112,530	0,000000
	Erro	1,02933	28	0,03676		
AC-E4	Intercepto	41,69380	1	41,69380	2737,444	0,000000
	TM	0,00249	1	0,00249	0,163	0,689217
	Erro	0,42647	28	0,01523		

Tabela 4.2 - ANOVA do parâmetro Ra de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	1,443531	1	1,443531	3830,884	0,000000
	TM	0,181698	1	0,181698	482,195	0,000000
	Erro	0,010551	28	0,000377		
AI-E2	Intercepto	0,838896	1	0,838896	4897,811	0,000000
	TM	0,122683	1	0,122683	716,272	0,000000
	Erro	0,004796	28	0,000171		
AI-E3	Intercepto	0,925097	1	0,925097	3452,134	0,000000
	TM	0,171114	1	0,171114	638,535	0,000000
	Erro	0,007503	28	0,000268		
AI-E4	Intercepto	1,000896	1	1,000896	1614,706	0,000000
	TM	0,144446	1	0,144446	233,029	0,000000
	Erro	0,017356	28	0,000620		
FF-E1	Intercepto	1,985570	1	1,985570	4128,140	0,000000
	TM	0,545124	1	0,545124	1133,351	0,000000
	Erro	0,013468	28	0,000481		
FF-E2	Intercepto	2,217366	1	2,217366	13651,53	0,000000
	TM	0,600396	1	0,600396	3696,42	0,000000
	Erro	0,004548	28	0,000162		
FF-E3	Intercepto	2,274530	1	2,274530	2357,029	0,000000
	TM	0,718056	1	0,718056	744,101	0,000000
	Erro	0,027020	28	0,000965		
FF-E4	Intercepto	2,859295	1	2,859295	400,5202	0,000000
	TM	0,673707	1	0,673707	94,3706	0,000000
	Erro	0,199891	28	0,007139		
AC-E1	Intercepto	56,17364	1	56,17364	2634,639	0,000000
	TM	0,04117	1	0,04117	1,931	0,175626
	Erro	0,59699	28	0,02132		
AC-E2	Intercepto	103,5251	1	103,5251	1435,571	0,000000
	TM	1,6283	1	1,6283	22,580	0,000055
	Erro	2,0192	28	0,0721		
AC-E3	Intercepto	171,0405	1	171,0405	9642,787	0,000000
	TM	0,0109	1	0,0109	0,616	0,439145
	Erro	0,4967	28	0,0177		
AC-E4	Intercepto	110,5224	1	110,5224	1936,018	0,000000
	TM	2,3085	1	2,3085	40,437	0,000001
	Erro	1,5985	28	0,0571		

Pelas Tabelas 4.1 e 4.2, o método de medição adotado provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Ra em quase todos os casos investigados. Tal efeito apenas não foi comprovado para as amostras torneadas de FF na condição E1 e AC na

condição E4, e para as amostras fresadas de AC na condição E1 e na condição E3. A variação das leituras de Ra nesses casos não foi suficiente para causar tais efeitos.

O quadro de ANOVA completo para o Ra considerando, além do tipo de medição, o material (M), o processo de usinagem (PR) e os parâmetros de corte avanço (f) e profundidade de corte (ap) como variáveis independentes para a obtenção das amostras e determinação dos demais parâmetros de rugosidade avaliados, é exibido no APÊNDICE II.

4.2.2 Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade (Rq)

Os valores médios de Rq encontrados na medição sem contato e com contato são exibidos nas Figs 4.10 e 4.11, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

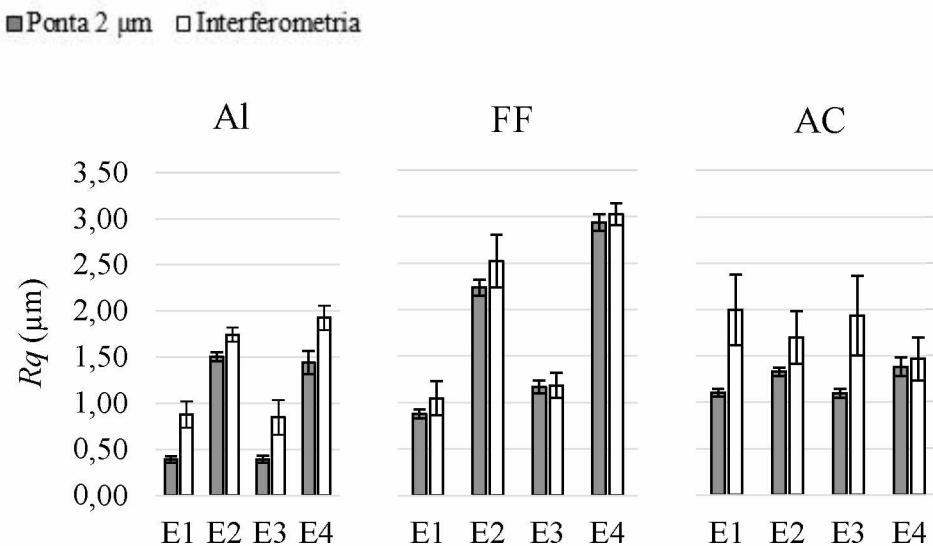


Figura 4.10 - Valores médios do parâmetro Rq para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

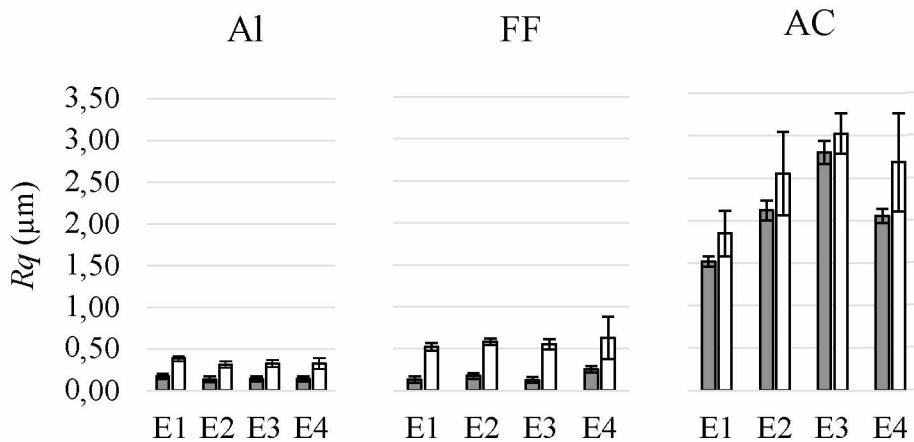


Figura 4.11 - Valores médios do parâmetro Rq para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Pelas Figs. 4.10 e 4.11, tem-se que todos os valores médios de Rq obtidos durante a medição sem contato foram maiores do que na medição com contato. Vale ressaltar que os parâmetros Ra e Rq , além de representarem rugosidades médias, estão matematicamente interligados, desta forma ambos apresentaram comportamentos similares. Tal fato pôde ser comprovado pela semelhança dos resultados, em que os maiores valores de Rq foram encontrados para as amostras de FF no torneamento ao passo que no fresamento, tais valores foram encontrados nas amostras de AC.

Em relação aos valores de incerteza expandida, o comportamento também foi semelhante ao obtido na medição de Ra .

A diferença entre as leituras médias encontrada durante a medição do parâmetro Rq para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.12 e 4.13, respectivamente. Nestas figuras, as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

Os maiores valores de diferença, em módulo, de Rq também foram observados para as amostras de aço carbono (AC), sendo o máximo valor igual a 1,21 μm .

Em alguns casos, a medição com contato forneceu resultados maiores do que na medição por interferometria, sendo a maior diferença entre esses valores igual a 0,10 μm para a amostra de AC fresada na condição E2, justificada pela não homogeneidade do acabamento superficial. Do mesmo modo, quando considerados os valores médios para cada condição, em todos os casos, a medição com contato forneceu valores menores de Rq como mostram as Figs. 4.10 e 4.11.

Os maiores valores de desvio padrão, exibidos por meio da barra de erros nas Figs. 4.12 e 4.13 refletem a baixa repetibilidade dos valores de diferença em virtude da baixa repetibilidade dos resultados obtidos na medição sem contato.

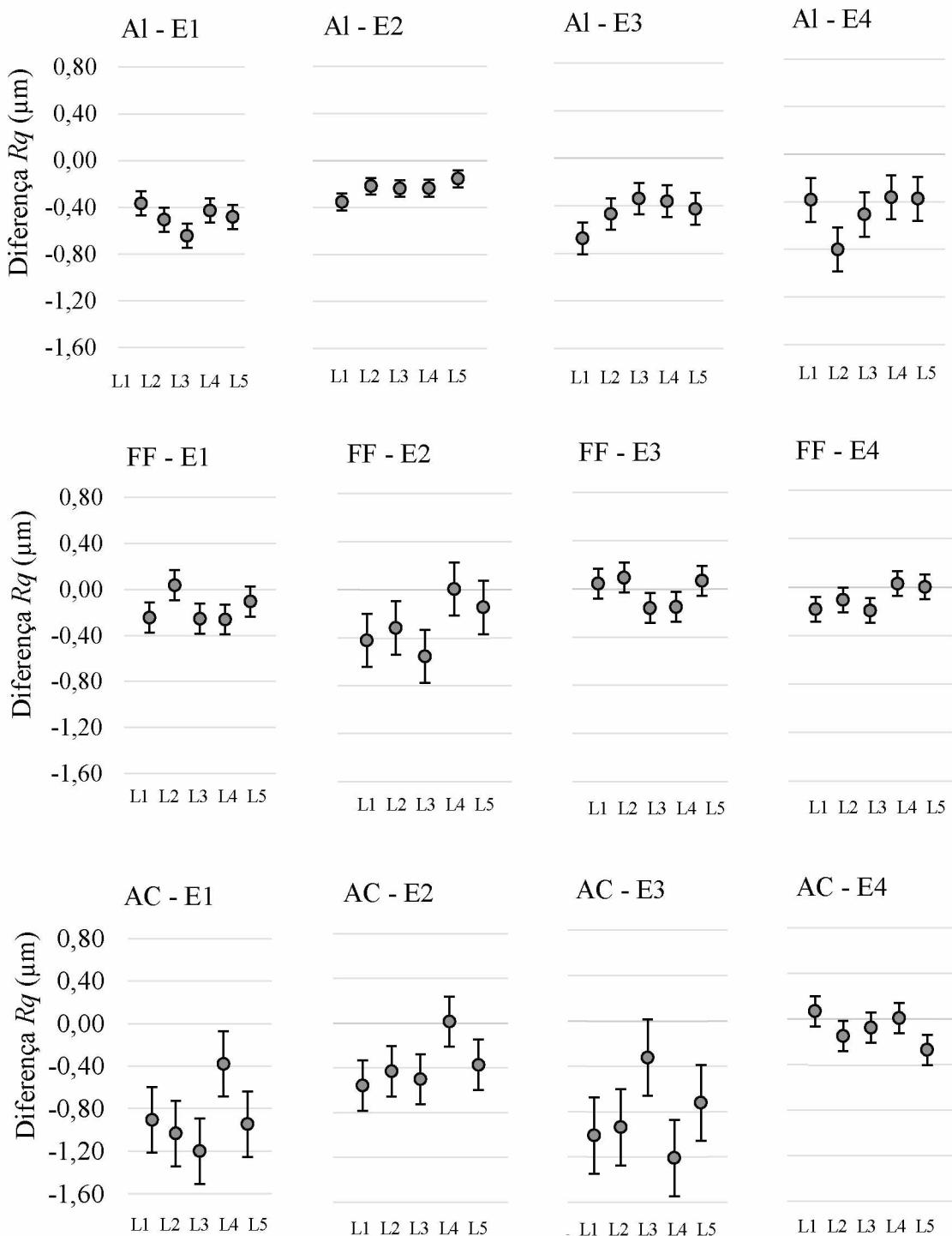


Figura 4.12 - Diferença associada à medição do Rq para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

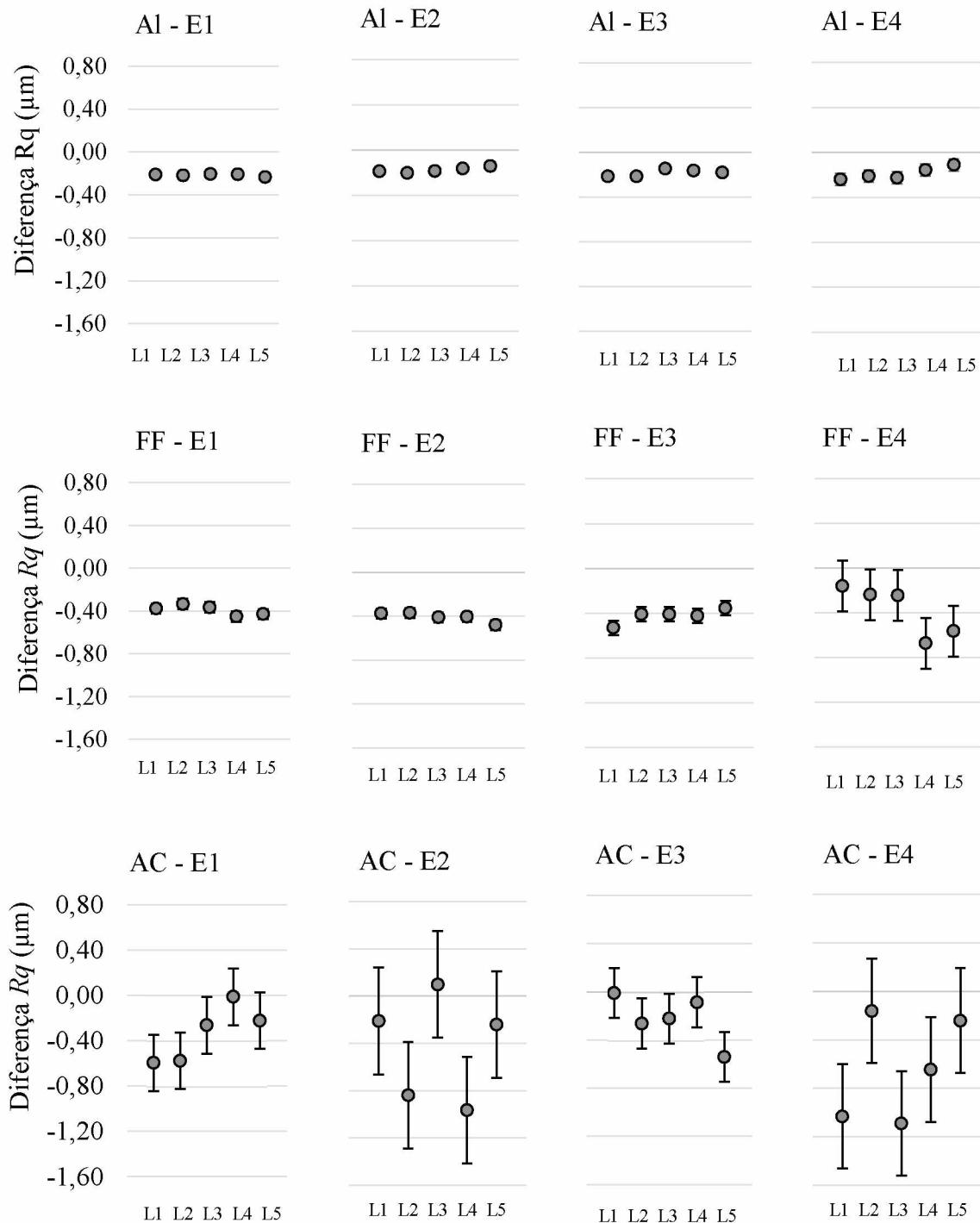


Figura 4.13 - Diferença associada à medição do Rq para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

A diferença percentual entre os valores médios de Rq encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.14 e 4.15, respectivamente.

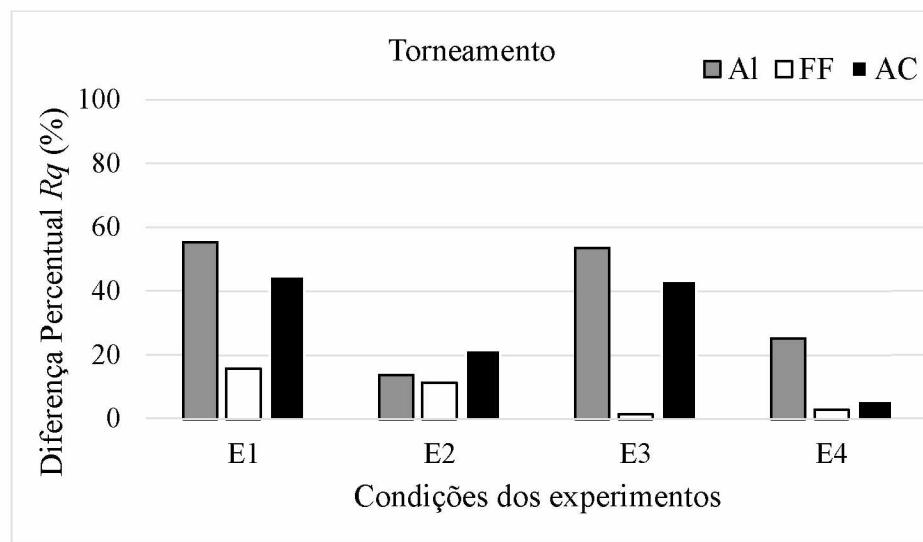


Figura 4.14 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rq para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

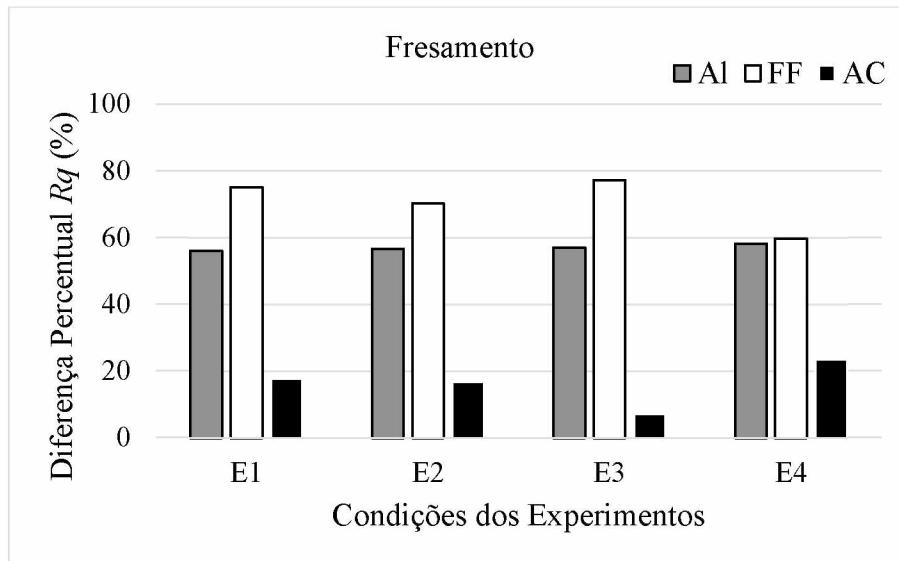


Figura 4.15 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rq para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram que os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte, apresentando comportamento semelhante aos encontrados para o Ra . No caso do torneamento (Fig. 4.14), as amostras de FF apresentaram as menores diferenças percentuais ao passo que as amostras de Al exibiram, em geral, as maiores. Para o fresamento (Fig. 4.15), as amostras de AC resultaram num melhor desempenho e as de FF em um pior (maiores diferenças percentuais).

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro Rq das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente.

Tabela 4.3 - ANOVA do parâmetro Rq de rugosidade para as amostras torneadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	10,25944	1	10,25944	1310,979	0,000000
	TM	2,53679	1	2,53679	324,159	0,000000
	Erro	0,21912	28	0,00783		
AI-E2	Intercepto	69,84853	1	69,84853	5399,555	0,000000
	TM	1,40667	1	1,40667	108,741	0,000000
	Erro	0,36221	28	0,01294		
AI-E3	Intercepto	10,00072	1	10,00072	875,1358	0,000000
	TM	2,16606	1	2,16606	189,5461	0,000000
	Erro	0,31997	28	0,01143		
AI-E4	Intercepto	77,98402	1	77,98402	6383,034	0,000000
	TM	2,95072	1	2,95072	241,518	0,000000
	Erro	0,34209	28	0,01222		
FF-E1	Intercepto	33,24848	1	33,24848	1789,536	0,000000
	TM	0,00158	1	0,00158	0,085	0,772950
	Erro	0,52022	28	0,01858		
FF-E2	Intercepto	170,0100	1	170,0100	5595,159	0,000000
	TM	0,5926	1	0,5926	19,503	0,000136
	Erro	0,8508	28	0,0304		
FF-E3	Intercepto	46,96444	1	46,96444	2679,323	0,000000
	TM	0,13390	1	0,13390	7,639	0,009986
	Erro	0,49080	28	0,01753		
FF-E4	Intercepto	221,0329	1	221,0329	2507,658	0,000000
	TM	2,9146	1	2,9146	33,067	0,000004
	Erro	2,4680	28	0,0881		
AC-E1	Intercepto	66,79028	1	66,79028	1472,968	0,000000
	TM	7,66368	1	7,66368	169,012	0,000000
	Erro	1,26963	28	0,04534		
AC-E2	Intercepto	70,14792	1	70,14792	3136,209	0,000000
	TM	0,87182	1	0,87182	38,978	0,000001
	Erro	0,62628	28	0,02237		
AC-E3	Intercepto	64,36047	1	64,36047	1190,915	0,000000
	TM	6,59042	1	6,59042	121,948	0,000000
	Erro	1,51320	28	0,05404		
AC-E4	Intercepto	61,86007	1	61,86007	3998,258	0,000000
	TM	0,02939	1	0,02939	1,900	0,179025
	Erro	0,43321	28	0,01547		

Tabela 4.4 - ANOVA do parâmetro Rq de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	2,362799	1	2,362799	4298,183	0,000000
	TM	0,315651	1	0,315651	574,203	0,000000
	Erro	0,015392	28	0,000550		
AI-E2	Intercepto	1,473379	1	1,473379	3299,406	0,000000
	TM	0,233803	1	0,233803	523,565	0,000000
	Erro	0,012504	28	0,000447		
AI-E3	Intercepto	1,495756	1	1,495756	2583,792	0,000000
	TM	0,300822	1	0,300822	519,645	0,000000
	Erro	0,016209	28	0,000579		
AI-E4	Intercepto	1,661437	1	1,661437	1355,190	0,000000
	TM	0,247333	1	0,247333	201,743	0,000000
	Erro	0,034327	28	0,001226		
FF-E1	Intercepto	3,534639	1	3,534639	3380,458	0,000000
	TM	0,956057	1	0,956057	914,354	0,000000
	Erro	0,029277	28	0,001046		
FF-E2	Intercepto	4,331646	1	4,331646	5546,295	0,000000
	TM	1,229594	1	1,229594	1574,388	0,000000
	Erro	0,021868	28	0,000781		
FF-E3	Intercepto	3,783724	1	3,783724	2284,534	0,000000
	TM	1,158834	1	1,158834	699,680	0,000000
	Erro	0,046375	28	0,001656		
FF-E4	Intercepto	5,774720	1	5,774720	334,6918	0,000000
	TM	1,089137	1	1,089137	63,1243	0,000000
	Erro	0,483108	28	0,017254		
AC-E1	Intercepto	91,25107	1	91,25107	3342,219	0,000000
	TM	0,32895	1	0,32895	12,048	0,001699
	Erro	0,76447	28	0,02730		
AC-E2	Intercepto	155,6418	1	155,6418	2001,347	0,000000
	TM	2,2808	1	2,2808	29,328	0,000009
	Erro	2,1775	28	0,0778		
AC-E3	Intercepto	267,1433	1	267,1433	9976,324	0,000000
	TM	0,0466	1	0,0466	1,741	0,197702
	Erro	0,7498	28	0,0268		
AC-E4	Intercepto	167,8264	1	167,8264	1621,361	0,000000
	TM	3,1469	1	3,1469	30,402	0,000007
	Erro	2,8983	28	0,1035		

Pelas Tabelas 4.3 e 4.4, pode-se concluir que o método de medição adotado provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rq em quase todas as condições investigadas. Tal efeito não foi comprovado para as amostras torneadas de FF na condição E1 e AC na condição E4, e para as amostras fresadas de AC na condição E3, sendo comprovado para as amostras fresadas de AC na condição E1, diferentemente do que aconteceu

para o Rq . Neste último caso, a variação das leituras de Rq nas medições sem e com contato nesses últimos casos foi suficiente para causar tais efeitos.

O quadro de ANOVA completo para o Rq é exibido no APÊNDICE II.

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

Os valores médios de Rp obtidos na medição sem contato e com contato são apresentados nas Figs 4.16 e 4.17, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

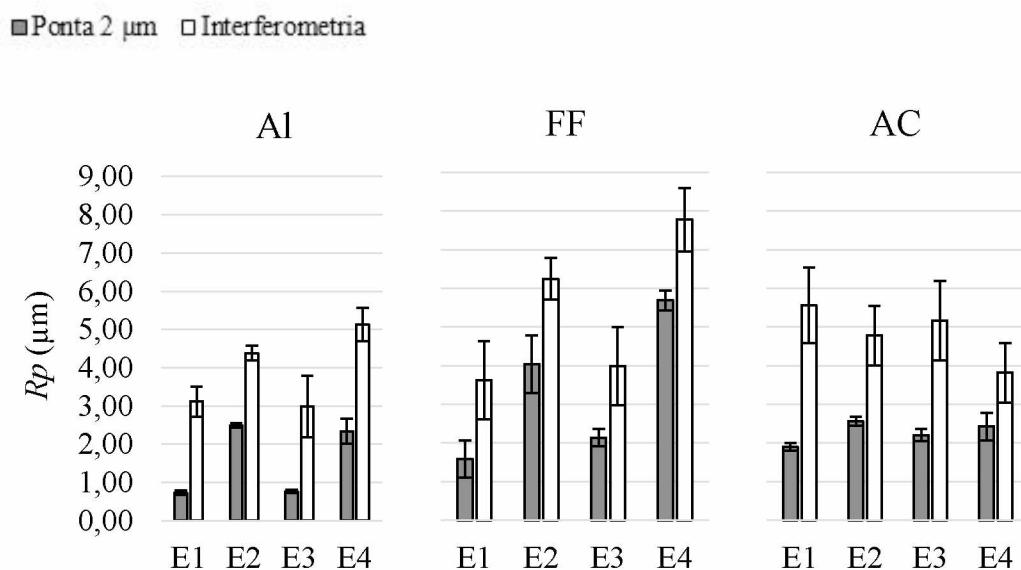


Figura 4.16 - Valores médios do parâmetro Rp para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

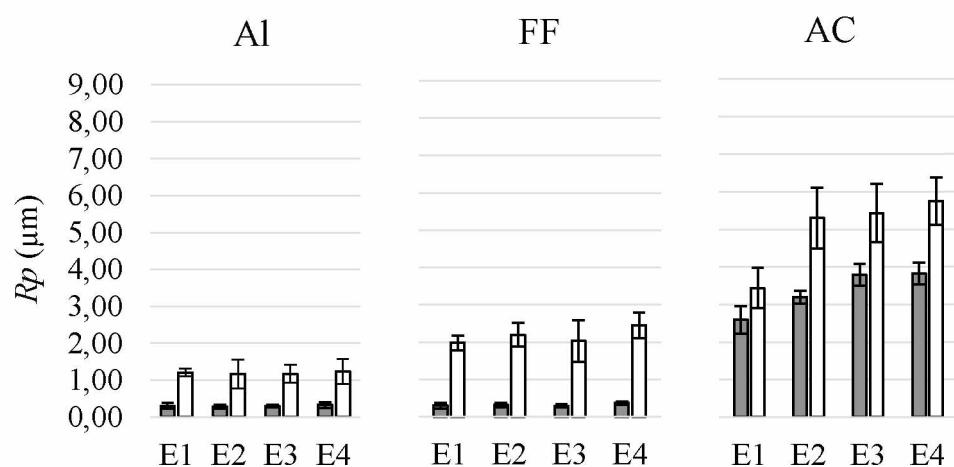


Figura 4.17 - Valores médios do parâmetro Rp para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores médios de R_p obtidos através da medição por interferometria tanto no torneamento quanto no fresamento foram maiores do que aqueles obtidos pela medição com contato.

Pela Figura 4.16, os picos mais altos em relação à linha média no comprimento de amostragem foram observados para as amostras de FF, sendo o máximo valor encontrado para a condição E4 e igual a $7,77 \mu\text{m}$. Destaca-se a significativa influência do avanço nos valores de R_p (a altura dos picos tende a aumentar com o aumento do avanço) e a baixa influência da profundidade de corte nestes mesmos valores. Isto porque o R_p é um parâmetro de amplitude.

Na Figura 4.17, por outro lado, o valor de R_p mostrou-se maior para as amostras de AC. Para as amostras de Al e FF, a variação nos parâmetros avanço e profundidade de corte não causaram mudanças expressivas na determinação do R_p .

Os valores de incerteza de medição encontrados na medição sem contato das amostras, novamente, foram maiores do que os encontrados para a medição com contato, ressaltando a baixa repetibilidade das leituras no primeiro tipo de medição.

A diferença entre as leituras médias encontradas durante a medição do parâmetro R_p para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.18 e 4.19, respectivamente, em que as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

Os maiores valores de diferença de R_p foram observados para as amostras de aço carbono (AC), sendo o máximo valor igual a $4,87 \mu\text{m}$ na condição E1 de torneamento. Para este parâmetro, ao contrário do observado para R_a e R_q , todos os resultados encontrados para a diferença entre as leituras médias foram negativos, indicando que a medição por interferometria forneceu valores maiores do que a medição com contato para todas as condições investigadas. Observa-se, ainda, a baixa repetibilidade dos valores encontrados.

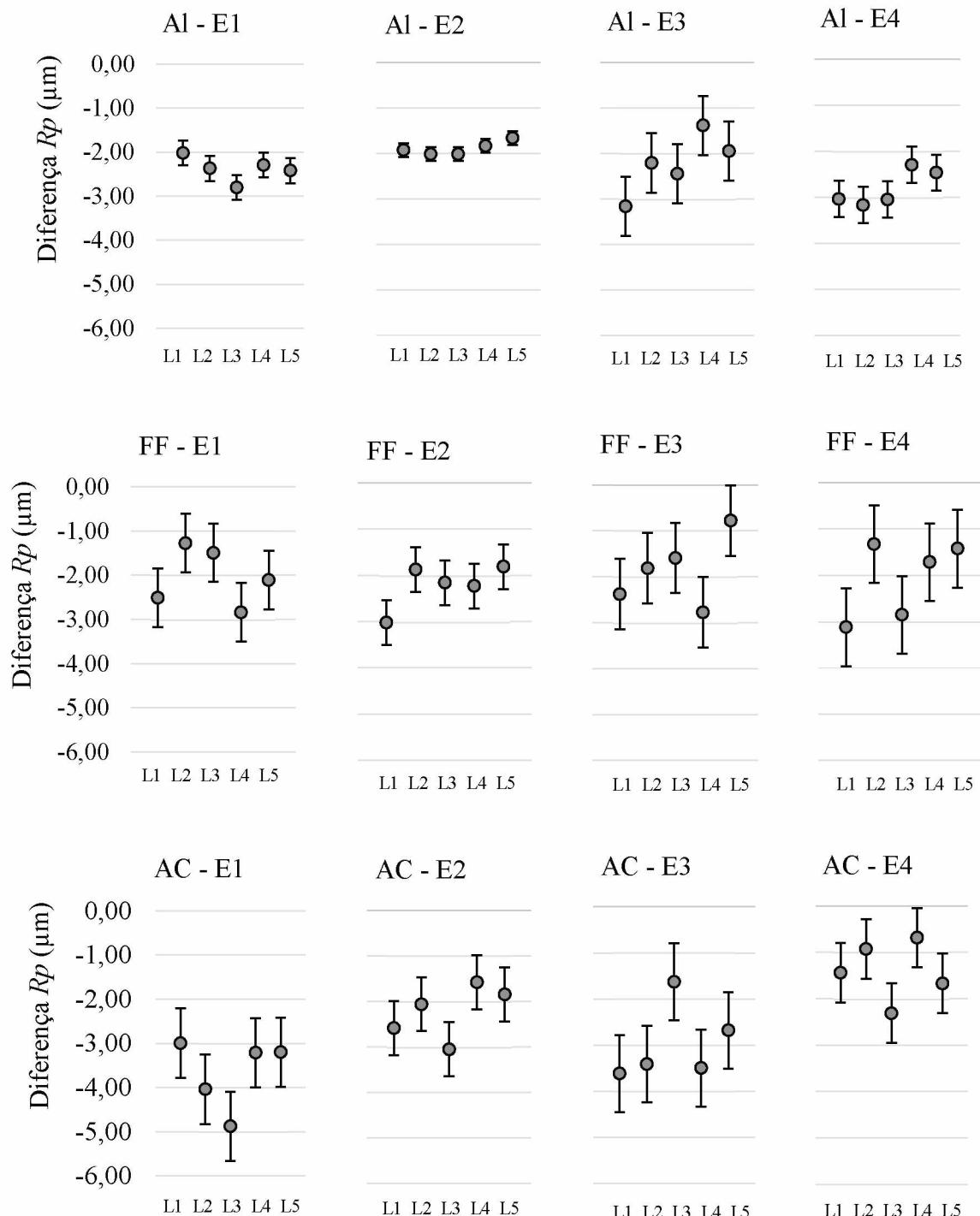


Figura 4.18 - Diferença associada à medição do R_p para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

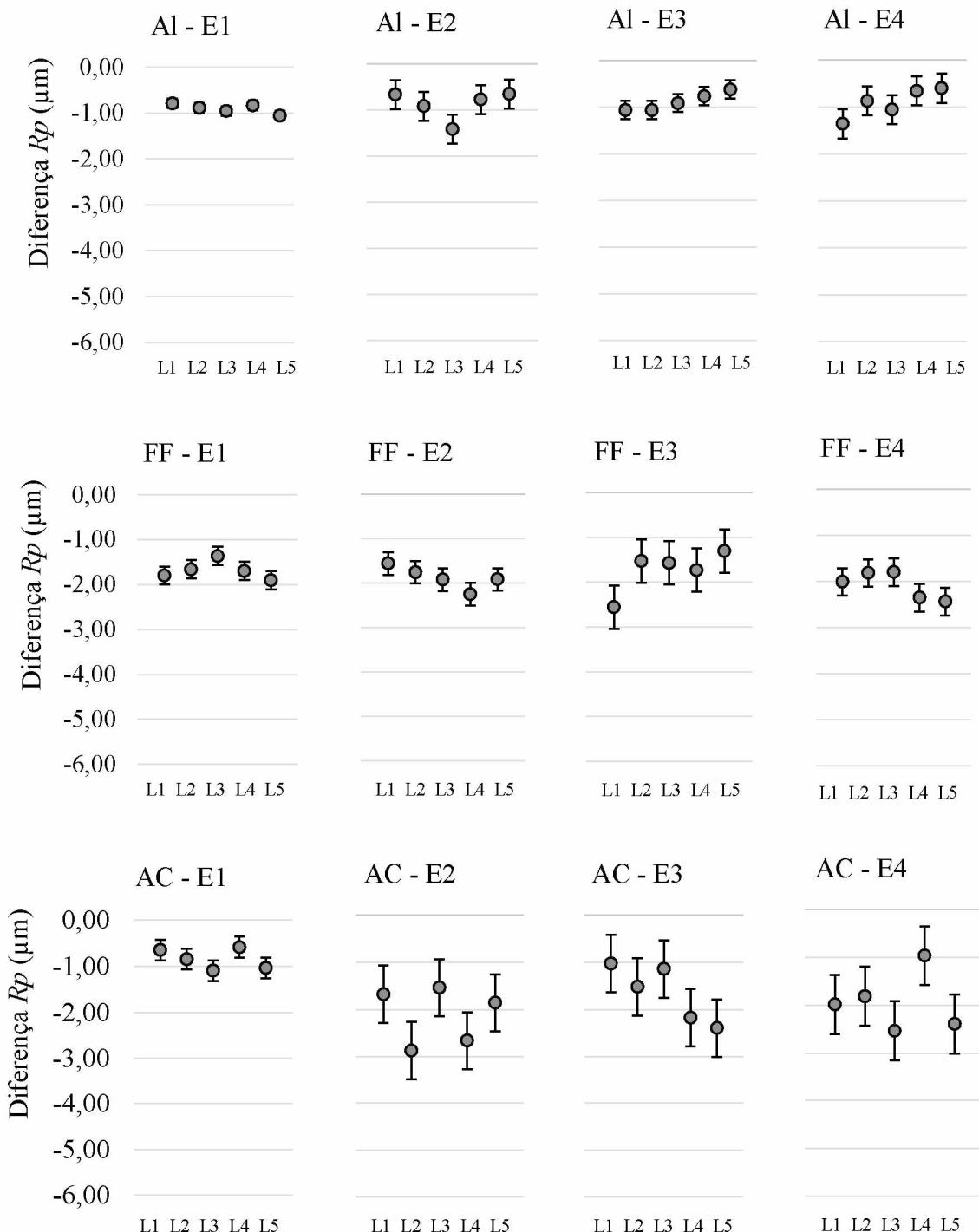


Figura 4.19 - Diferença associada à medição do R_p para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

A diferença percentual entre os valores médios de R_p encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.20 e 4.21, respectivamente.

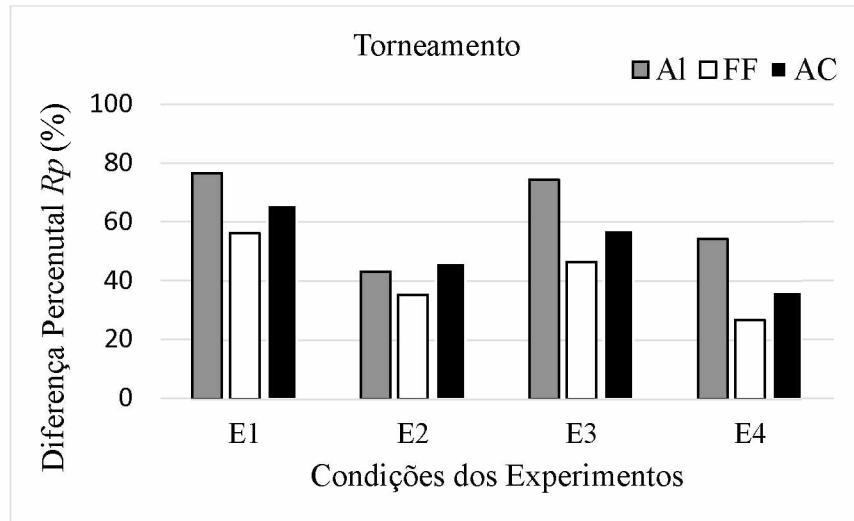


Figura 4.20 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_p para as amostras torneadas de A1, FF e AC nas condições de corte investigadas.

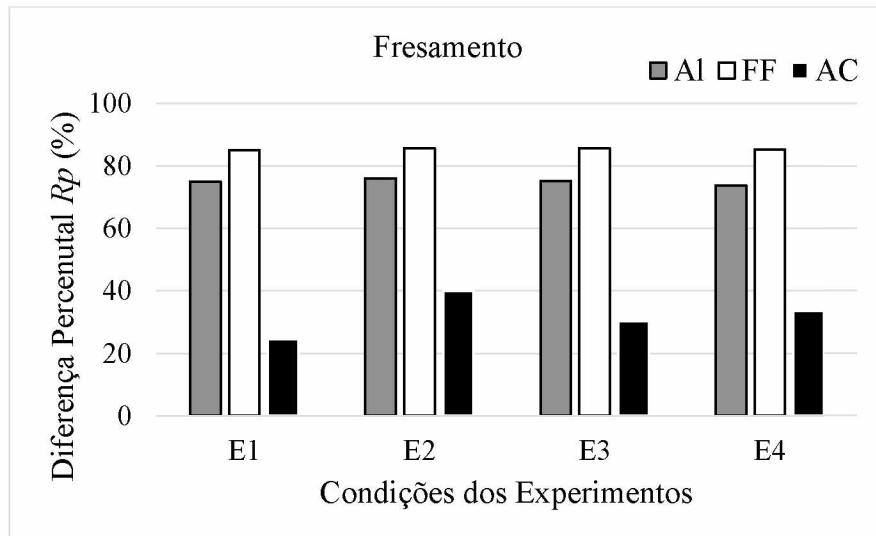


Figura 4.21 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_p para as amostras fresadas de A1, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram que o processo de usinagem exerce influência expressiva nos valores de diferença percentual de modo que no torneamento as variações das condições de corte também influenciam esta diferença ao passo que no fresamento, esta variação é pouco significativa nos resultados obtidos. Em ambos os casos, para cada tipo de material analisado, os resultados foram consideravelmente distintos.

No caso da Fig. 4.20, as amostras de FF apresentaram as menores diferenças percentuais ao passo que as amostras de Al exibiram, em geral, as maiores. Para a Fig. 4.21, as amostras de AC apresentaram as menores diferenças indicando um melhor desempenho, ao passo que as de FF indicaram um pior desempenho.

Tabela 4.5 - ANOVA do parâmetro R_p de rugosidade para as amostras torneadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Al-E1	Intercepto	104,8529	1	104,8529	2284,453	0,000000
	TM	46,2907	1	46,2907	1008,545	0,000000
	Erro	1,2852	28	0,0459		
Al-E2	Intercepto	348,5137	1	348,5137	26187,45	0,000000
	TM	28,4831	1	28,4831	2140,23	0,000000
	Erro	0,3726	28	0,0133		
Al-E3	Intercepto	100,8294	1	100,8294	555,6886	0,000000
	TM	39,3512	1	39,3512	216,8714	0,000000
	Erro	5,0806	28	0,1814		
Al-E4	Intercepto	428,9059	1	428,9059	6512,576	0,000000
	TM	54,0654	1	54,0654	820,937	0,000000
	Erro	1,8440	28	0,0659		
FF-E1	Intercepto	234,0260	1	234,0260	675,8719	0,000000
	TM	20,7170	1	20,7170	59,8311	0,000000
	Erro	9,6952	28	0,3463		
FF-E2	Intercepto	812,3657	1	812,3657	4247,370	0,000000
	TM	32,4315	1	32,4315	169,565	0,000000
	Erro	5,3554	28	0,1913		
FF-E3	Intercepto	333,1600	1	333,1600	879,7800	0,000000
	TM	13,1394	1	13,1394	34,6973	0,000002
	Erro	10,6032	28	0,3787		
FF-E4	Intercepto	1207,292	1	1207,292	2728,956	0,000000
	TM	61,439	1	61,439	138,877	0,000000
	Erro	12,387	28	0,442		
AC-E1	Intercepto	409,8435	1	409,8435	1517,835	0,000000
	TM	104,6984	1	104,6984	387,745	0,000000
	Erro	7,5605	28	0,2700		
AC-E2	Intercepto	407,1286	1	407,1286	2172,134	0,000000
	TM	35,6786	1	35,6786	190,354	0,000000
	Erro	5,2481	28	0,1874		
AC-E3	Intercepto	392,7225	1	392,7225	1213,034	0,000000
	TM	71,8378	1	71,8378	221,891	0,000000
	Erro	9,0651	28	0,3238		
AC-E4	Intercepto	298,0519	1	298,0519	1587,423	0,000000
	TM	13,2798	1	13,2798	70,728	0,000000
	Erro	5,2572	28	0,1878		

Tabela 4.6 - ANOVA do parâmetro R_p de rugosidade para as amostras fresadas.

Peca	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	18,60719	1	18,60719	2081,316	0,000000
	TM	5,28074	1	5,28074	590,680	0,000000
	Erro	0,25032	28	0,00894		
AI-E2	Intercepto	15,02059	1	15,02059	350,5692	0,000000
	TM	6,17963	1	6,17963	144,2279	0,000000
	Erro	1,19970	28	0,04285		
AI-E3	Intercepto	15,34434	1	15,34434	925,4707	0,000000
	TM	6,31979	1	6,31979	381,1688	0,000000
	Erro	0,46424	28	0,01658		
AI-E4	Intercepto	17,56835	1	17,56835	553,0836	0,000000
	TM	6,55536	1	6,55536	206,3746	0,000000
	Erro	0,88940	28	0,03176		
FF-E1	Intercepto	38,74172	1	38,74172	3172,601	0,000000
	TM	21,45424	1	21,45424	1756,911	0,000000
	Erro	0,34192	28	0,01221		
FF-E2	Intercepto	47,32407	1	47,32407	1643,809	0,000000
	TM	26,57045	1	26,57045	922,929	0,000000
	Erro	0,80610	28	0,02879		
FF-E3	Intercepto	41,44279	1	41,44279	461,4727	0,000000
	TM	21,81502	1	21,81502	242,9140	0,000000
	Erro	2,51455	28	0,08981		
FF-E4	Intercepto	57,66076	1	57,66076	1625,318	0,000000
	TM	33,79103	1	33,79103	952,487	0,000000
	Erro	0,99335	28	0,03548		
AC-E1	Intercepto	259,6451	1	259,6451	2231,800	0,000000
	TM	7,3580	1	7,3580	63,246	0,000000
	Erro	3,2575	28	0,1163		
AC-E2	Intercepto	549,8737	1	549,8737	2422,228	0,000000
	TM	31,5753	1	31,5753	139,091	0,000000
	Erro	6,3563	28	0,2270		
AC-E3	Intercepto	775,7173	1	775,7173	1798,161	0,000000
	TM	3,7101	1	3,7101	8,600	0,006632
	Erro	12,0791	28	0,4314		
AC-E4	Intercepto	631,5059	1	631,5059	2124,663	0,000000
	TM	41,0237	1	41,0237	138,022	0,000000
	Erro	8,3223	28	0,2972		

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro R_p das amostras de AI, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente. Pelas tabelas, o método de medição adotado provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios de R_p em todos os casos

investigados, o que indica uma maior sensibilidade deste parâmetro durante sua medição sem e com contato quando comparado com os parâmetros R_a e R_g .

O quadro de ANOVA completo para o R_p é exibido no APÊNDICE II.

Essa maior sensibilidade de R_p pode ser vista na Fig. 4.22, que representa os perfis obtidos através da medição sem contato (a) e medição com contato (b), em que se nota o achatamento dos picos do perfil quando se realiza a medição com ponta de raio igual a 2 μm . Este fato, por outro lado, não é encontrado na medição por interferometria.

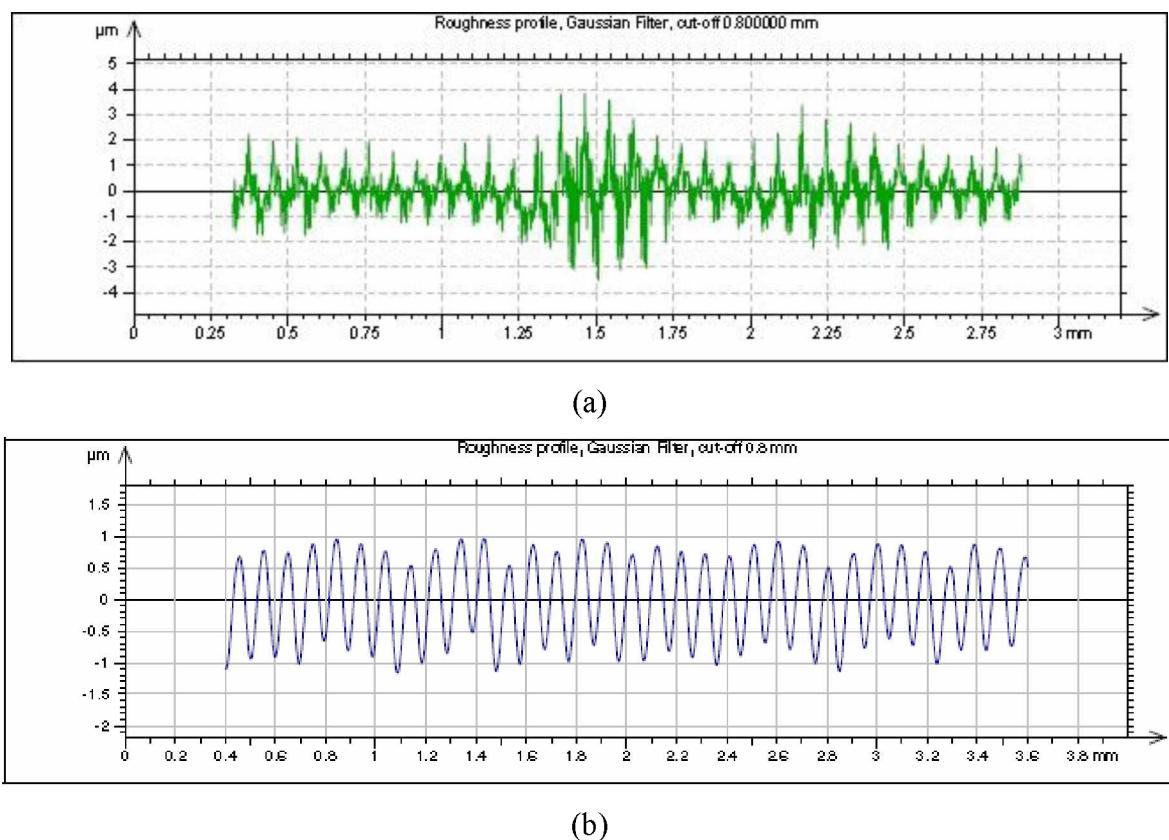


Figura 4.22 - Perfis efetivos referentes à amostra torneada de Al na condição E1 para a medição sem contato (a) e medição com contato (b).

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

Os valores médios de R_v encontrados na medição sem contato e com contato são exibidos nas Figs 4.23 e 4.24, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Pela Figura 4.23, os vales mais profundos em relação à linha média no comprimento de amostragem foram observados para as amostras de FF, sendo o máximo valor encontrado para a condição E4, semelhante ao ocorrido para o R_p , e igual a 7,93 μm . Na Fig. 4.24, o valor de

Rv mostrou-se maior para as amostras de AC. Para as amostras de Al e FF, a mudança nos parâmetros de corte não provocou variações significativas na determinação da maior profundidade do vale do perfil. Em ambas as figuras, os valores médios de Rv obtidos através da medição por interferometria foram maiores do que aqueles obtidos pela medição com contato, sendo que os valores de incerteza de medição encontrados na medição sem contato das amostras também foram maiores.

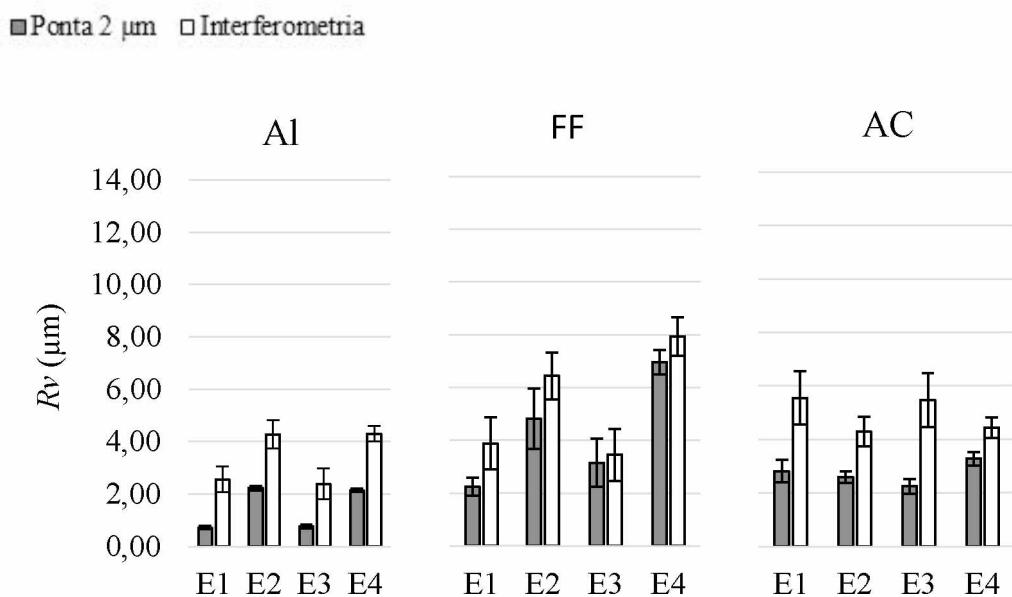


Figura 4.23 - Valores médios do parâmetro Rv para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

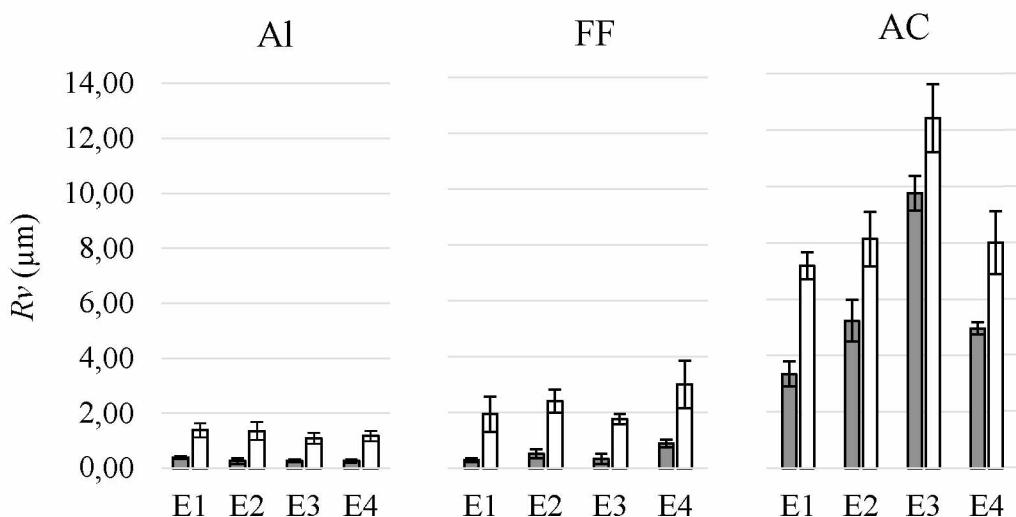


Figura 4.24 - Valores médios do parâmetro Rv para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A diferença entre as leituras médias obtidas pelos dois tipos de medição analisados relacionada ao parâmetro Rv para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.25 e 4.26, respectivamente, em que as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

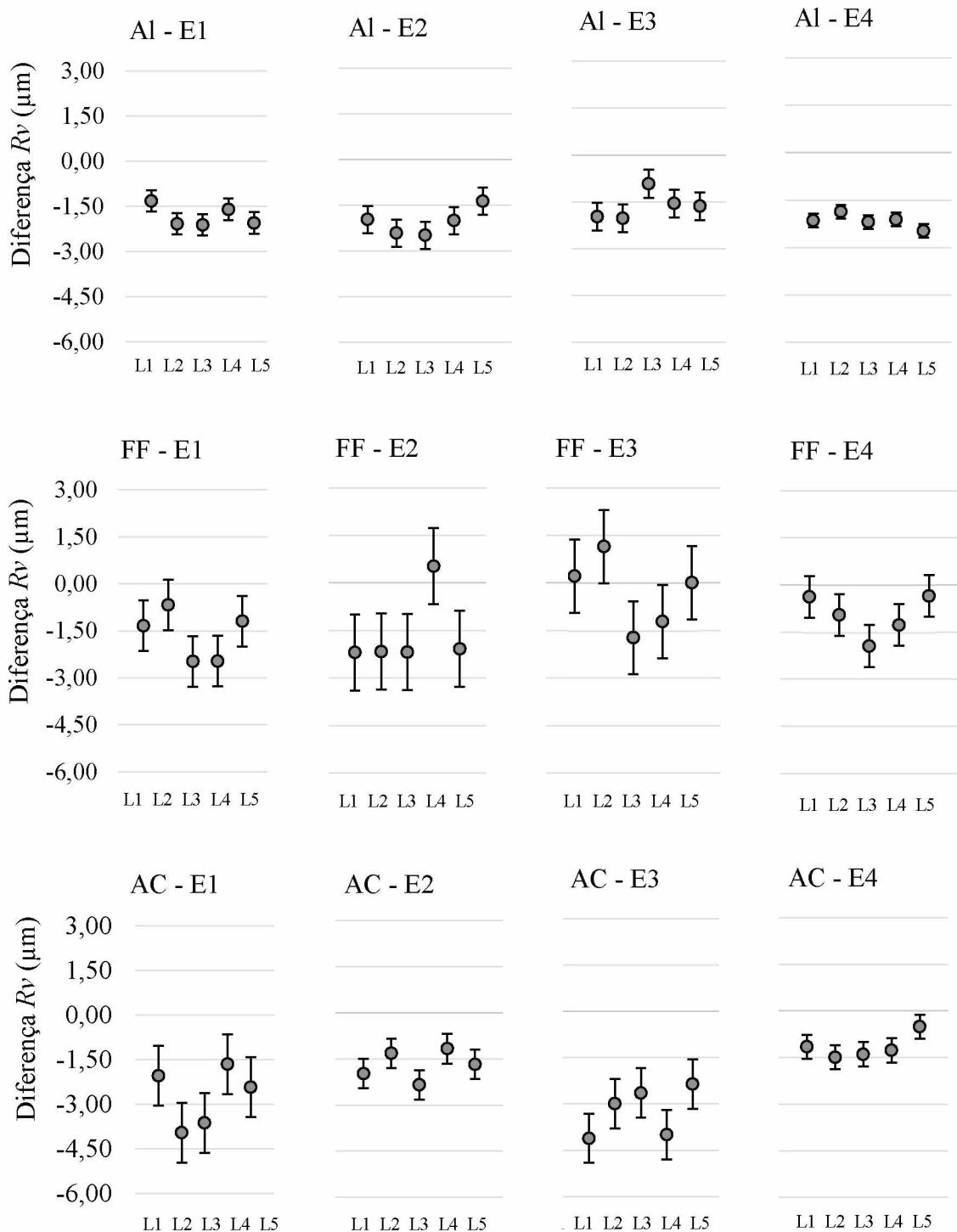


Figura 4.25 - Diferença associada à medição do Rv para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

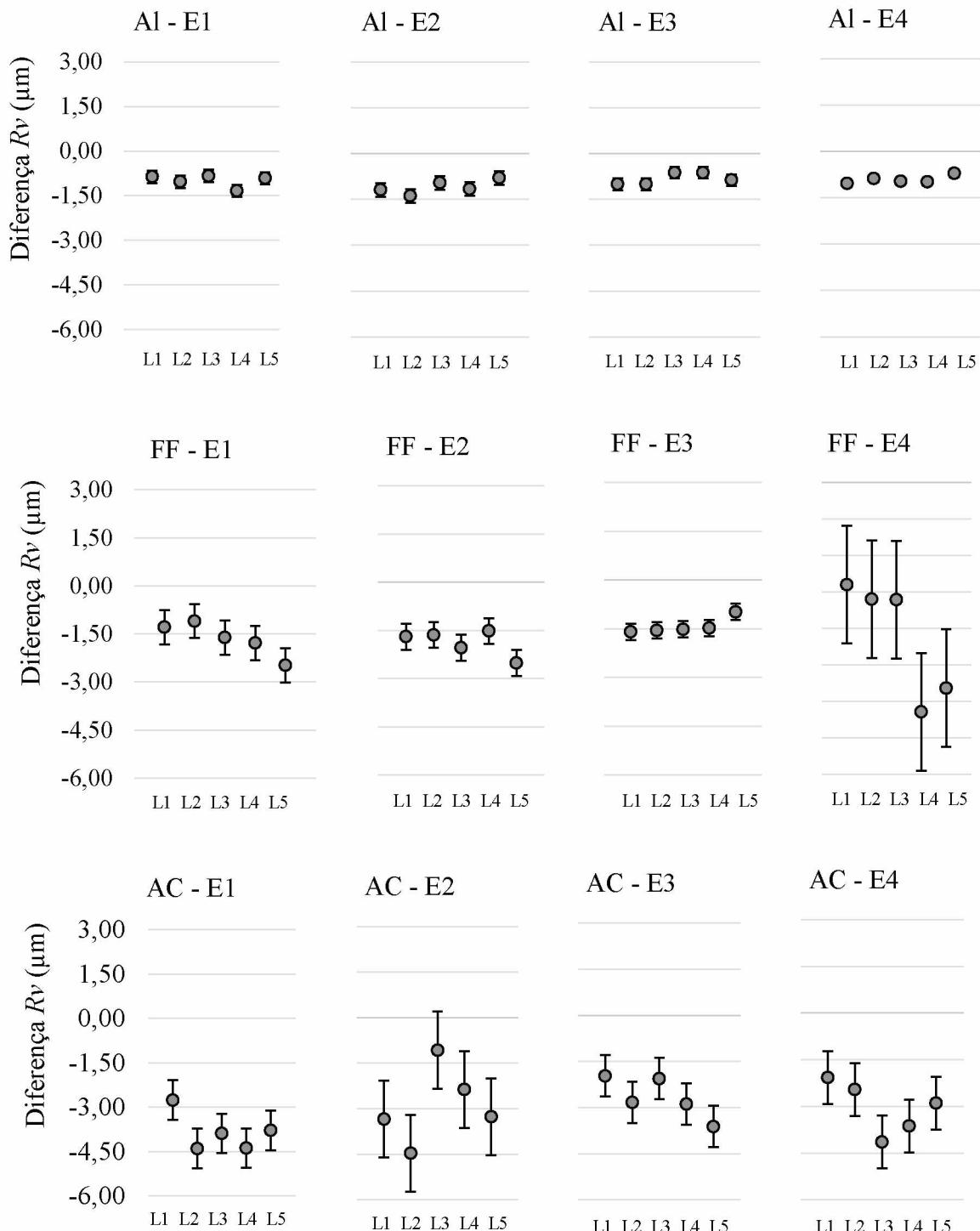


Figura 4.26 - Diferença associada à medição do R_V para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

Os maiores valores de diferença de R_V foram observados para as amostras de aço carbono (AC), sendo o máximo valor igual a $4,47 \mu\text{m}$ na condição E2 de fresamento.

Diferentemente do R_p , a medição com contato forneceu resultados maiores do que na medição por interferometria em alguns casos. A justificativa deste fato deve-se à não homogeneidade do acabamento superficial associada à coleta de dados em diferentes regiões. Todavia, quando considerados os valores médios para cada condição, em todos os casos, a medição com contato forneceu valores menores de R_v como mostram as Figs. 4.23 e 4.24.

As barras de erros extensas, expressando os valores de desvio padrão da diferença entre as leituras médias nas Figs. 4.25 e 4.26 refletem, novamente, a baixa repetibilidade desses valores causada pela variabilidade dos resultados obtidos na medição sem contato.

A diferença percentual entre os valores médios de R_v encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.27 e 4.28, respectivamente.

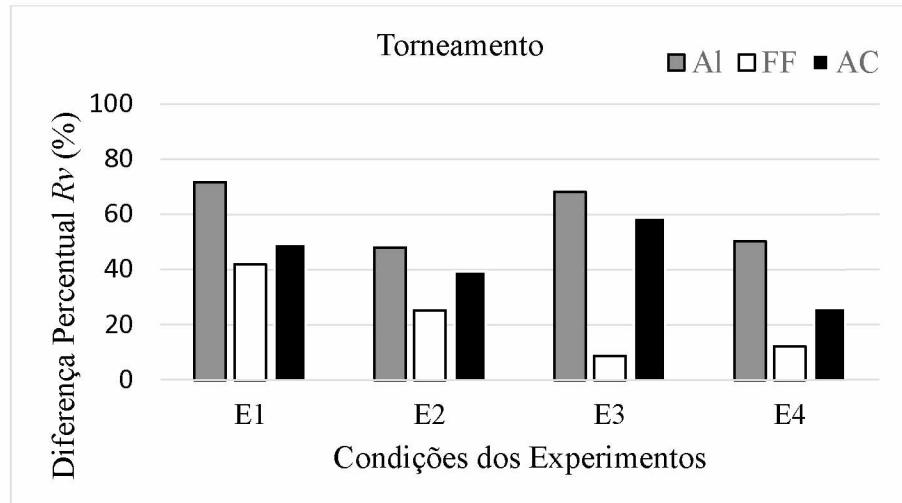


Figura 4.27 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_v para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

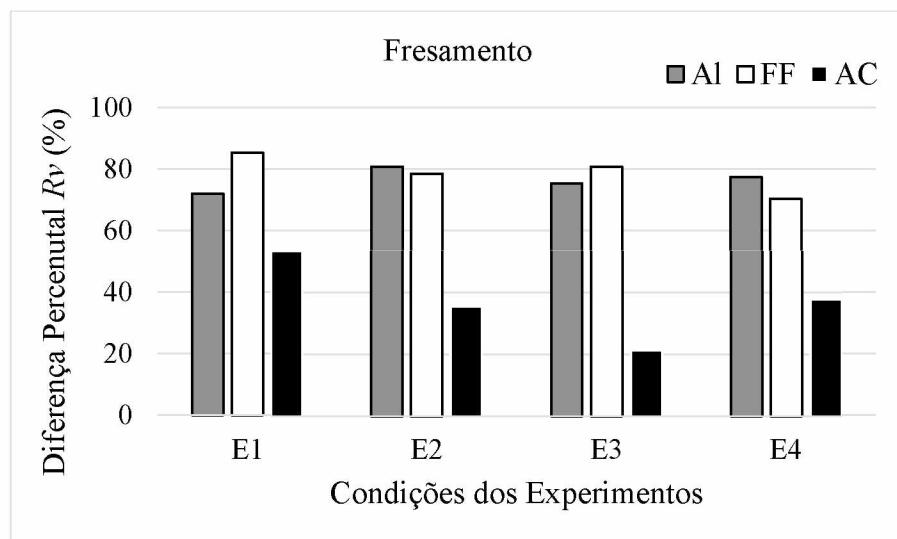


Figura 4.28 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_v para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram que os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte. No caso do torneamento (Fig. 4.27), as amostras de FF apresentaram as menores diferenças percentuais ao passo que as amostras de Al exibiram, em geral, as maiores. Para o fresamento (Fig. 4.28), as amostras de AC resultaram num melhor desempenho e as de FF em um pior (menores diferenças percentuais). Comportamento análogo ao visto para os parâmetros R_a , R_q e R_p .

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro R_v das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente.

O quadro de ANOVA completo para o R_v é exibido no APÊNDICE II.

Tabela 4.7 - ANOVA do parâmetro R_v de rugosidade para as amostras torneadas.

Peca	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	70,69525	1	70,69525	893,1756	0,000000
	TM	31,12795	1	31,12795	393,2757	0,000000
	Erro	2,21621	28	0,07915		
AI-E2	Intercepto	267,0083	1	267,0083	1700,512	0,000000
	TM	49,7168	1	49,7168	316,634	0,000000
	Erro	4,3965	28	0,1570		
AI-E3	Intercepto	65,03664	1	65,03664	584,5422	0,000000
	TM	25,12636	1	25,12636	225,8329	0,000000
	Erro	3,11530	28	0,11126		
AI-E4	Intercepto	270,6039	1	270,6039	3612,027	0,000000
	TM	50,2864	1	50,2864	671,224	0,000000
	Erro	2,0977	28	0,0749		
FF-E1	Intercepto	311,7625	1	311,7625	935,5396	0,000000
	TM	12,7144	1	12,7144	38,1534	0,000001
	Erro	9,3308	28	0,3332		
FF-E2	Intercepto	975,4571	1	975,4571	2128,316	0,000000
	TM	16,4079	1	16,4079	35,800	0,000002
	Erro	12,8331	28	0,4583		
FF-E3	Intercepto	317,2269	1	317,2269	705,5514	0,000000
	TM	1,1738	1	1,1738	2,6107	0,117361
	Erro	12,5892	28	0,4496		
FF-E4	Intercepto	1257,081	1	1257,081	1033,120	0,000000
	TM	63,473	1	63,473	52,164	0,000000
	Erro	34,070	28	1,217		
AC-E1	Intercepto	473,1327	1	473,1327	1239,378	0,000000
	TM	75,2036	1	75,2036	196,997	0,000000
	Erro	10,6890	28	0,3818		
AC-E2	Intercepto	361,7354	1	361,7354	3659,786	0,000000
	TM	20,1937	1	20,1937	204,306	0,000000
	Erro	2,7675	28	0,0988		
AC-E3	Intercepto	442,7438	1	442,7438	1503,357	0,000000
	TM	79,7361	1	79,7361	270,748	0,000000
	Erro	8,2461	28	0,2945		
AC-E4	Intercepto	402,1611	1	402,1611	4139,820	0,000000
	TM	18,2521	1	18,2521	187,886	0,000000
	Erro	2,7200	28	0,0971		

Tabela 4.8 - ANOVA do parâmetro Rv de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	22,81993	1	22,81993	1148,128	0,000000
	TM	7,82221	1	7,82221	393,555	0,000000
	Erro	0,55652	28	0,01988		
AI-E2	Intercepto	20,94072	1	20,94072	603,7386	0,000000
	TM	8,05215	1	8,05215	232,1504	0,000000
	Erro	0,97118	28	0,03469		
AI-E3	Intercepto	14,11158	1	14,11158	741,1256	0,000000
	TM	4,86857	1	4,86857	255,6922	0,000000
	Erro	0,53314	28	0,01904		
AI-E4	Intercepto	16,62392	1	16,62392	1695,157	0,000000
	TM	5,50236	1	5,50236	561,081	0,000000
	Erro	0,27459	28	0,00981		
FF-E1	Intercepto	45,30298	1	45,30298	335,4030	0,000000
	TM	15,06601	1	15,06601	111,5420	0,000000
	Erro	3,78197	28	0,13507		
FF-E2	Intercepto	63,88658	1	63,88658	965,1372	0,000000
	TM	26,51733	1	26,51733	400,5984	0,000000
	Erro	1,85344	28	0,06619		
FF-E3	Intercepto	37,26589	1	37,26589	1132,118	0,000000
	TM	12,63624	1	12,63624	383,882	0,000000
	Erro	0,92168	28	0,03292		
FF-E4	Intercepto	117,3644	1	117,3644	560,4890	0,000000
	TM	31,5258	1	31,5258	150,5556	0,000000
	Erro	5,8631	28	0,2094		
AC-E1	Intercepto	967,8618	1	967,8618	2398,833	0,000000
	TM	68,4003	1	68,4003	169,529	0,000000
	Erro	11,2972	28	0,4035		
AC-E2	Intercepto	1276,997	1	1276,997	2592,013	0,000000
	TM	77,664	1	77,664	157,640	0,000000
	Erro	13,795	28	0,493		
AC-E3	Intercepto	3490,501	1	3490,501	4288,776	0,000000
	TM	80,613	1	80,613	99,049	0,000000
	Erro	22,788	28	0,814		
AC-E4	Intercepto	1271,811	1	1271,811	2600,140	0,000000
	TM	66,756	1	66,756	136,479	0,000000
	Erro	13,696	28	0,489		

Pelas Tabelas 4.7 e 4.8, comprova-se que o método de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rv em quase todos os casos investigados. Tal efeito apenas não foi comprovado para as amostras torneadas de FF na condição E3, em que a variação das leituras deste parâmetro não foi expressiva para causar tais efeitos.

4.2.5 Altura máxima do perfil de rugosidade (R_z)

Os valores médios de R_z obtidos na medição sem contato e com contato exibidos nas Figs 4.29 e 4.30, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

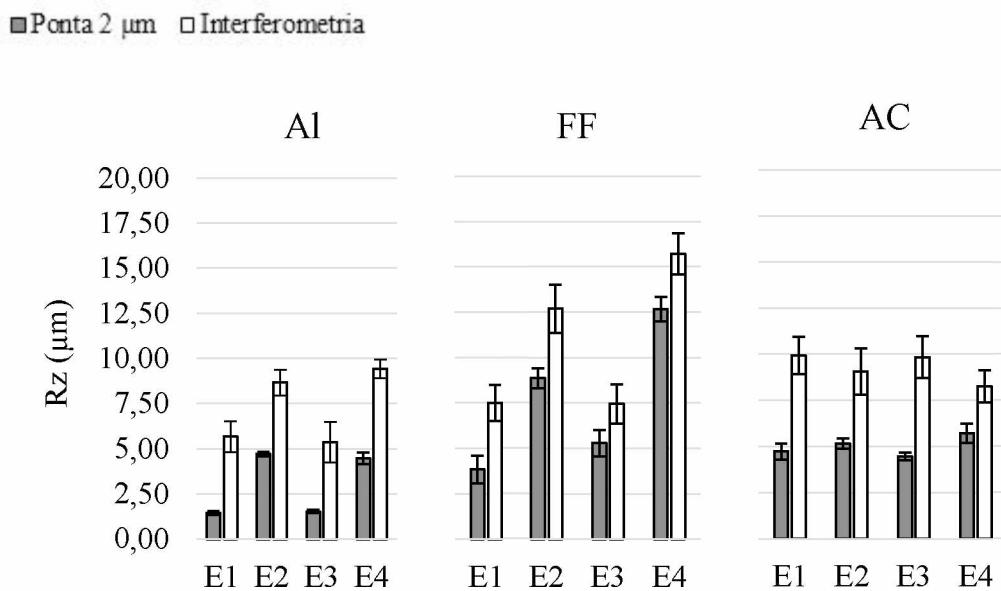


Figura 4.29 - Valores médios do parâmetro R_z para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

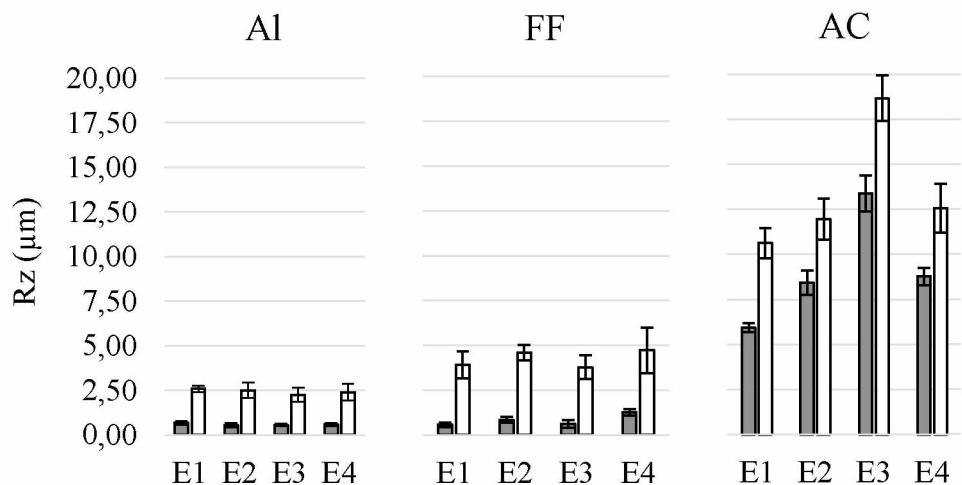


Figura 4.30 - Valores médios do parâmetro R_z para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores médios obtidos para o parâmetro R_z na medição sem contato das amostras analisadas foram maiores em todos os casos quando comparados com os obtidos na medição

com contato. Pela Figura 4.29, o maior valor médio encontrado deste parâmetro no caso do torneamento foi igual a 15,70 μm , em amostras de FF na condição E4. No fresamento, Fig. 4.30, tal valor foi igual a 18,66 μm para o AC na condição E3.

Os valores de incerteza de medição encontrados na medição sem contato das amostras, novamente, foram maiores do que os encontrados para a medição com contato, ressaltando a baixa repetibilidade das leituras no primeiro tipo de medição.

A diferença das leituras médias encontrada durante a medição do parâmetro Rz para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.31 e 4.32, respectivamente. Nestas figuras, as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

Os maiores valores de diferença, em módulo, de Rz foram observados para as amostras de aço carbono (AC). Em alguns casos, como na condição E4 para as amostras de FF fresadas, percebe-se o quanto destoante as diferenças das leituras podem estar em uma mesma amostra em função da não homogeneidade do acabamento superficial, o que torna o desvio padrão das leituras alto como mostram as Figs. 4.31 e 4.32.

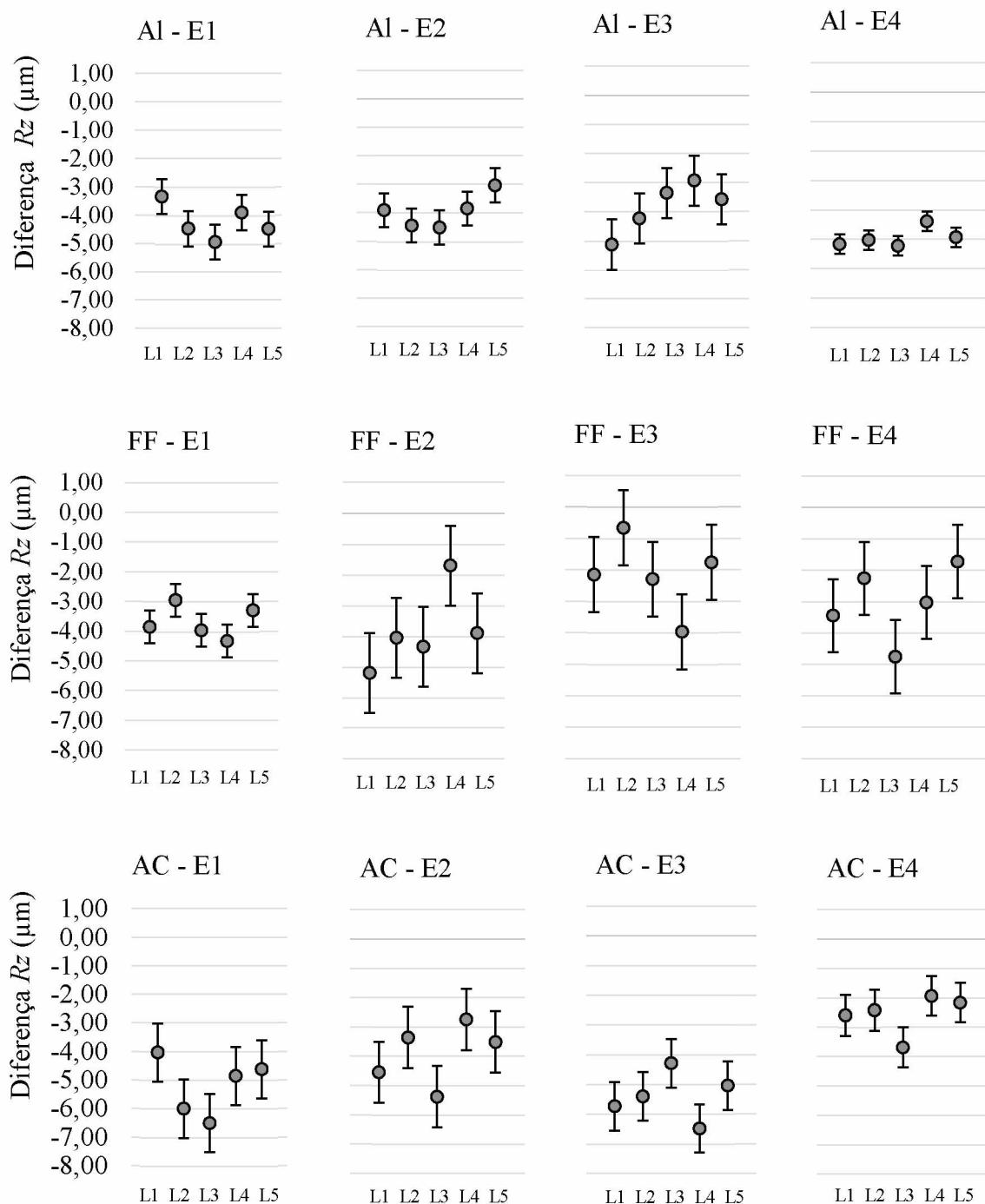


Figura 4.31 - Diferença associada à medição do Rz para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

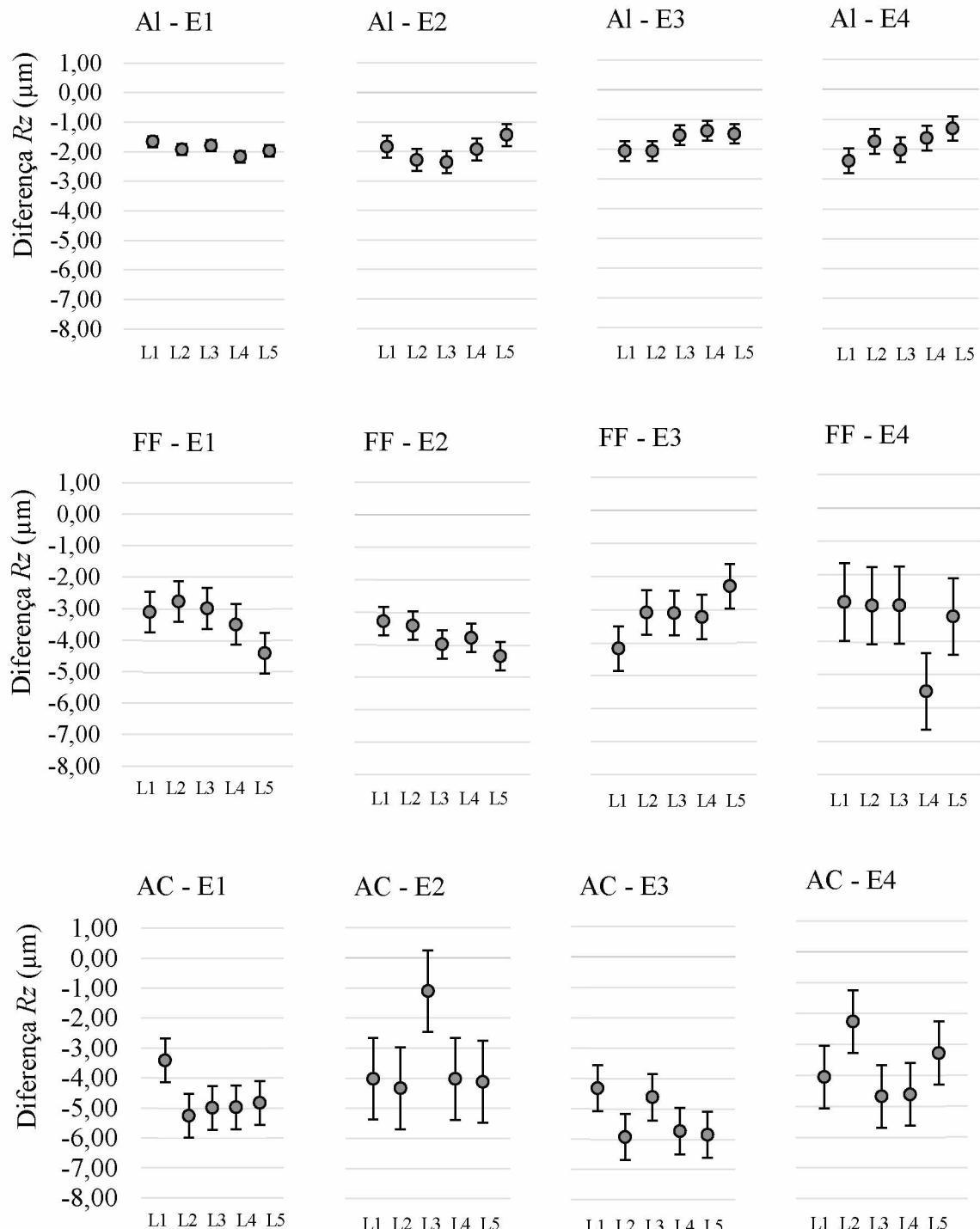


Figura 4.32 - Diferença associada à medição do R_z para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

A diferença percentual entre os valores médios de R_z encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.33 e 4.34, respectivamente.

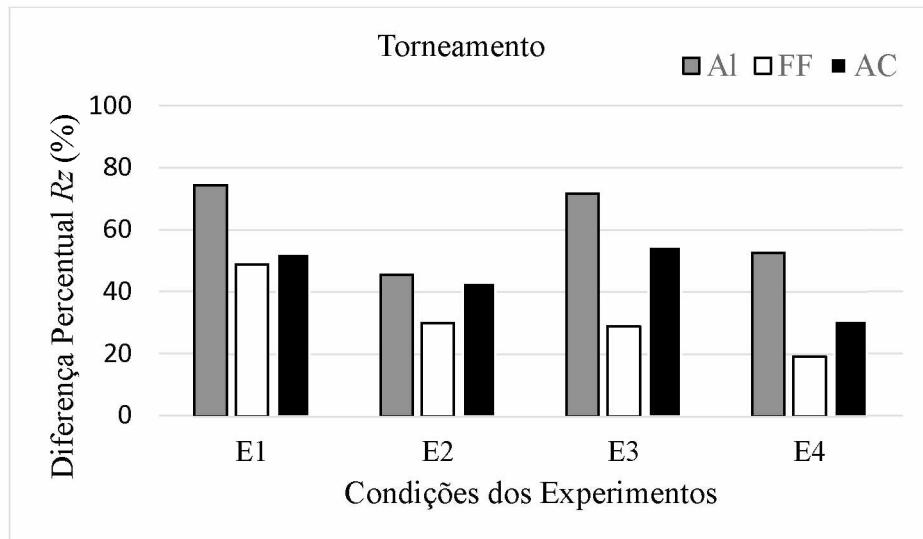


Figura 4.33 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_z para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

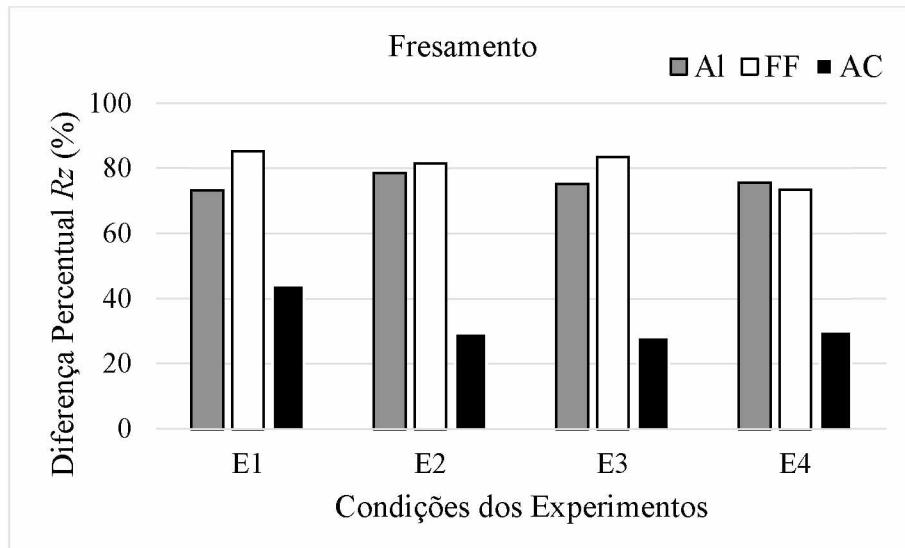


Figura 4.34 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_z para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.33 e 4.34 mostram o que vem se repetindo para os demais parâmetros de rugosidade. Ou seja, os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte. No caso do torneamento (Fig. 4.33), as amostras de FF apresentaram as menores diferenças percentuais ao passo que as amostras de Al exibiram, de modo geral, as maiores. Para o fresamento (Fig. 4.34), as amostras de AC exibiram o melhor desempenho e as de FF e Al o pior (maiores diferenças percentuais).

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro Rz das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente.

Tabela 4.9 - ANOVA do parâmetro Rz de rugosidade para as amostras torneadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Al-E1	Intercepto	347,8573	1	347,8573	1512,294	0,000000
	TM	153,2613	1	153,2613	666,297	0,000000
	Erro	6,4405	28	0,2300		
Al-E2	Intercepto	1225,624	1	1225,624	5152,235	0,000000
	TM	153,462	1	153,462	645,117	0,000000
	Erro	6,661	28	0,238		
Al-E3	Intercepto	327,8374	1	327,8374	867,0808	0,000000
	TM	127,3582	1	127,3582	336,8434	0,000000
	Erro	10,5866	28	0,3781		
Al-E4	Intercepto	1380,465	1	1380,465	11932,01	0,000000
	TM	208,794	1	208,794	1804,70	0,000000
	Erro	3,239	28	0,116		
FF-E1	Intercepto	1085,892	1	1085,892	2179,667	0,000000
	TM	65,920	1	65,920	132,319	0,000000
	Erro	13,949	28	0,498		
FF-E2	Intercepto	3503,485	1	3503,485	5060,408	0,000000
	TM	105,875	1	105,875	152,925	0,000000
	Erro	19,385	28	0,692		
FF-E3	Intercepto	1300,579	1	1300,579	2326,971	0,000000
	TM	22,168	1	22,168	39,662	0,000001
	Erro	15,650	28	0,559		
FF-E4	Intercepto	4930,041	1	4930,041	1930,730	0,000000
	TM	249,404	1	249,404	97,673	0,000000
	Erro	71,497	28	2,553		
AC-E1	Intercepto	1499,304	1	1499,304	3503,691	0,000000
	TM	243,577	1	243,577	569,210	0,000000
	Erro	11,982	28	0,428		
AC-E2	Intercepto	1536,386	1	1536,386	3198,697	0,000000
	TM	109,556	1	109,556	228,091	0,000000
	Erro	13,449	28	0,480		
AC-E3	Intercepto	1495,341	1	1495,341	3767,154	0,000000
	TM	231,420	1	231,420	583,008	0,000000
	Erro	11,114	28	0,397		
AC-E4	Intercepto	1393,052	1	1393,052	4785,408	0,000000
	TM	62,583	1	62,583	214,983	0,000000
	Erro	8,151	28	0,291		

Tabela 4.10 - ANOVA do parâmetro Rz de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	82,64260	1	82,64260	3629,416	0,000000
	TM	25,95509	1	25,95509	1139,870	0,000000
	Erro	0,63757	28	0,02277		
AI-E2	Intercepto	71,43510	1	71,43510	1230,257	0,000000
	TM	28,33792	1	28,33792	488,036	0,000000
	Erro	1,62583	28	0,05807		
AI-E3	Intercepto	58,89420	1	58,89420	1170,374	0,000000
	TM	22,27689	1	22,27689	442,697	0,000000
	Erro	1,40898	28	0,05032		
AI-E4	Intercepto	68,37455	1	68,37455	1048,477	0,000000
	TM	24,06760	1	24,06760	369,060	0,000000
	Erro	1,82597	28	0,06521		
FF-E1	Intercepto	169,0129	1	169,0129	955,4023	0,000000
	TM	71,7055	1	71,7055	405,3394	0,000000
	Erro	4,9533	28	0,1769		
FF-E2	Intercepto	221,7244	1	221,7244	3059,656	0,000000
	TM	105,7996	1	105,7996	1459,967	0,000000
	Erro	2,0291	28	0,0725		
FF-E3	Intercepto	157,2973	1	157,2973	994,4566	0,000000
	TM	67,6633	1	67,6633	427,7771	0,000000
	Erro	4,4289	28	0,1582		
FF-E4	Intercepto	270,8438	1	270,8438	594,6687	0,000000
	TM	89,3741	1	89,3741	196,2311	0,000000
	Erro	12,7527	28	0,4555		
AC-E1	Intercepto	2229,939	1	2229,939	4856,013	0,000000
	TM	120,668	1	120,668	262,772	0,000000
	Erro	12,858	28	0,459		
AC-E2	Intercepto	3115,420	1	3115,420	6608,097	0,000000
	TM	91,863	1	91,863	194,850	0,000000
	Erro	13,201	28	0,471		
AC-E3	Intercepto	7916,575	1	7916,575	9872,931	0,000000
	TM	175,387	1	175,387	218,729	0,000000
	Erro	22,452	28	0,802		
AC-E4	Intercepto	3307,143	1	3307,143	4188,973	0,000000
	TM	127,403	1	127,403	161,374	0,000000
	Erro	22,106	28	0,789		

Pelas Tabelas 4.9 e 4.10, comprova-se que o método de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rz em todas as condições investigadas.

O quadro de ANOVA completo para o Rz é exibido no APÊNDICE II.

4.2.6 Altura total do perfil de rugosidade (R_t)

Os valores médios de R_t obtidos na medição sem contato e com contato são exibidos nas Figs 4.35 e 4.36, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

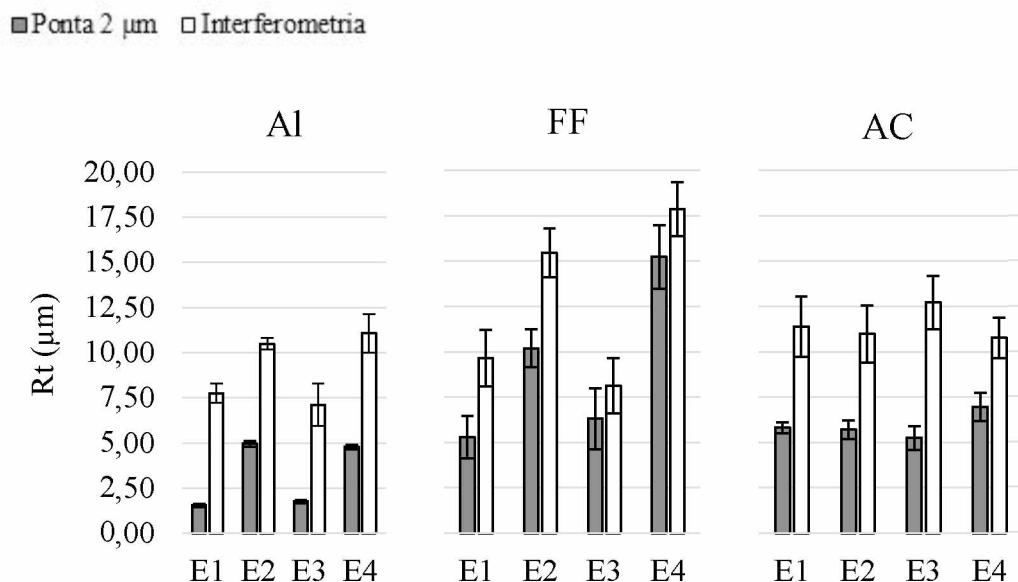


Figura 4.35 - Valores médios do parâmetro R_t para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

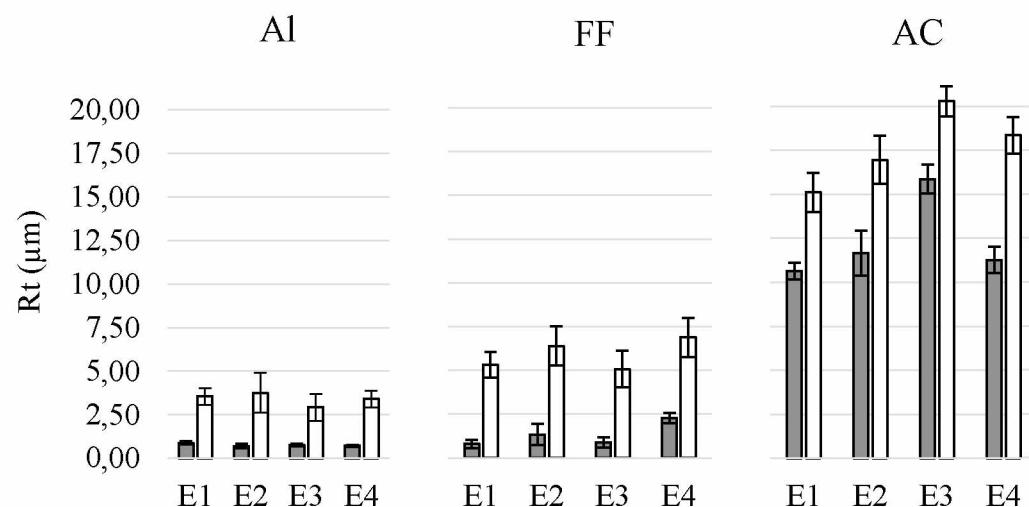


Figura 4.36 - Valores médios do parâmetro R_t para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Há diferenças entre os valores de Rt e Rz , pois não necessariamente o maior pico e o maior vale de um perfil avaliado se encontram no mesmo comprimento de amostragem. Desta forma, o parâmetro Rt exibiu valores maiores ou iguais ao Rz , visto que abrange o comprimento de avaliação. Tal fato pode ser observado pelos valores encontrados mostrados nas Figs. 4.35 e 4.36. No caso da primeira, relativa ao processo de torneamento, o máximo valor médio de Rt foi igual a 17,88 μm para o FF na condição E4, sendo que o Rz nessa mesma condição e material foi igual a 15,70 μm . Para a segunda, relativa ao processo de fresamento, o que aconteceu foi semelhante, o máximo valor médio de Rt foi igual a 20,29 μm para o AC na condição E3 ao passo que o Rz nesta mesma condição foi igual a 18,66 μm .

Destaca-se que os valores médios obtidos para o parâmetro Rt na medição sem contato das amostras analisadas também foram maiores em todos os casos quando comparados com os obtidos na medição com contato. Por sua vez, os valores de incerteza encontrados na medição sem contato continuam sendo maiores do que os encontrados para a medição com contato, ressaltando a baixa repetibilidade das leituras no primeiro tipo de medição.

A diferença entre as leituras médias encontradas durante a medição do parâmetro Rt para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.37 e 4.38, respectivamente. Nestas figuras, as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

Os maiores valores de diferença, em módulo, de Rt foram observados para as amostras de aço carbono (AC), destacando que para alguns casos como na condição E4 de AC fresado, semelhante ao discutido para o Rz , percebe-se a discrepância dos erros das leituras em uma mesma amostra, fruto da não homogeneidade do acabamento superficial associada ao posicionamento distinto tanto da ponta quanto da luz branca nas amostras para a medição da rugosidade.

Desta forma, os maiores valores de desvio padrão, exibidos por meio da barra de erros nas Figs. 4.37 e 4.38, indicam a baixa repetibilidade dos valores de diferença em virtude da baixa repetibilidade dos resultados obtidos na medição sem contato.

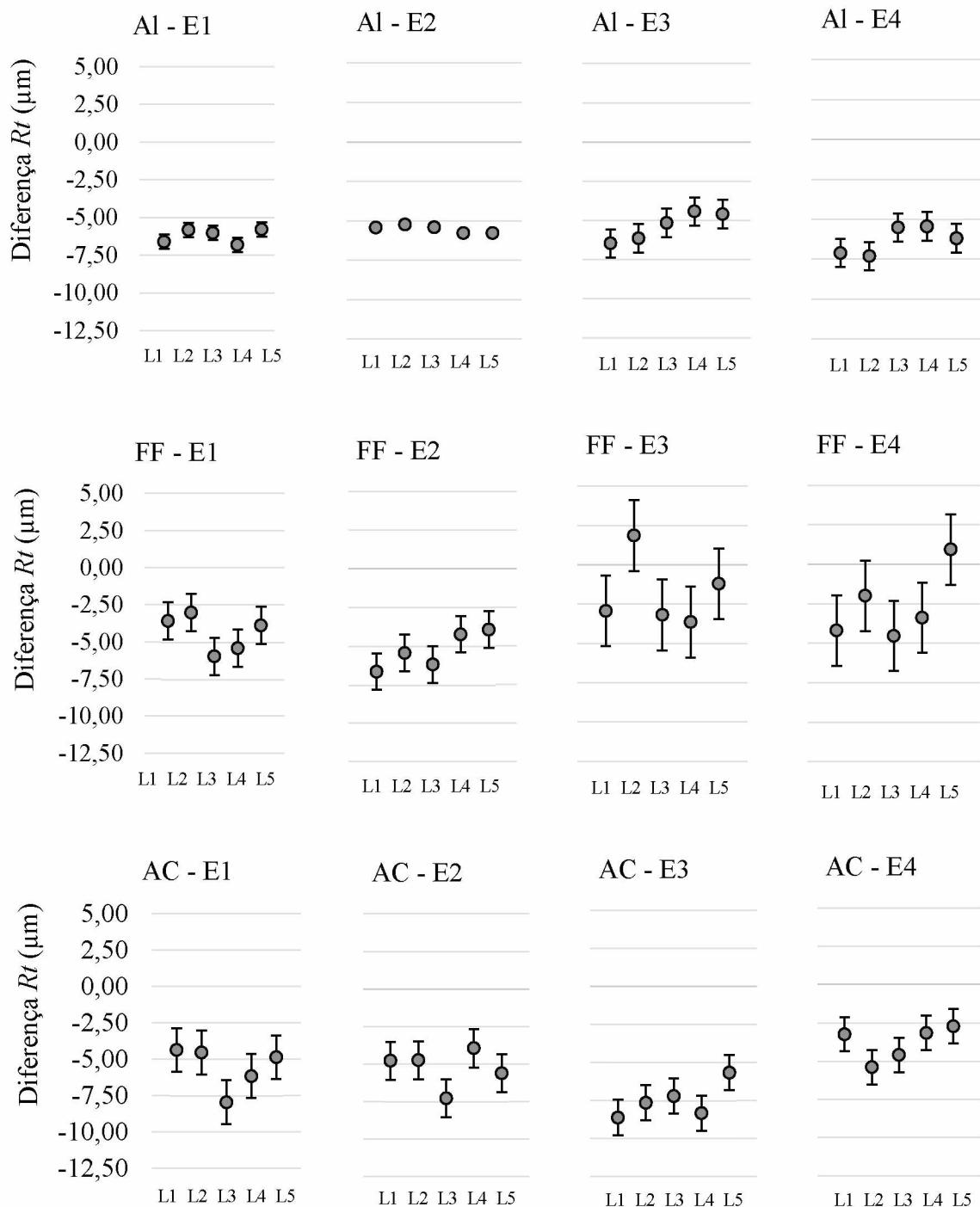


Figura 4.37 - Diferença associada à medição do Rt para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

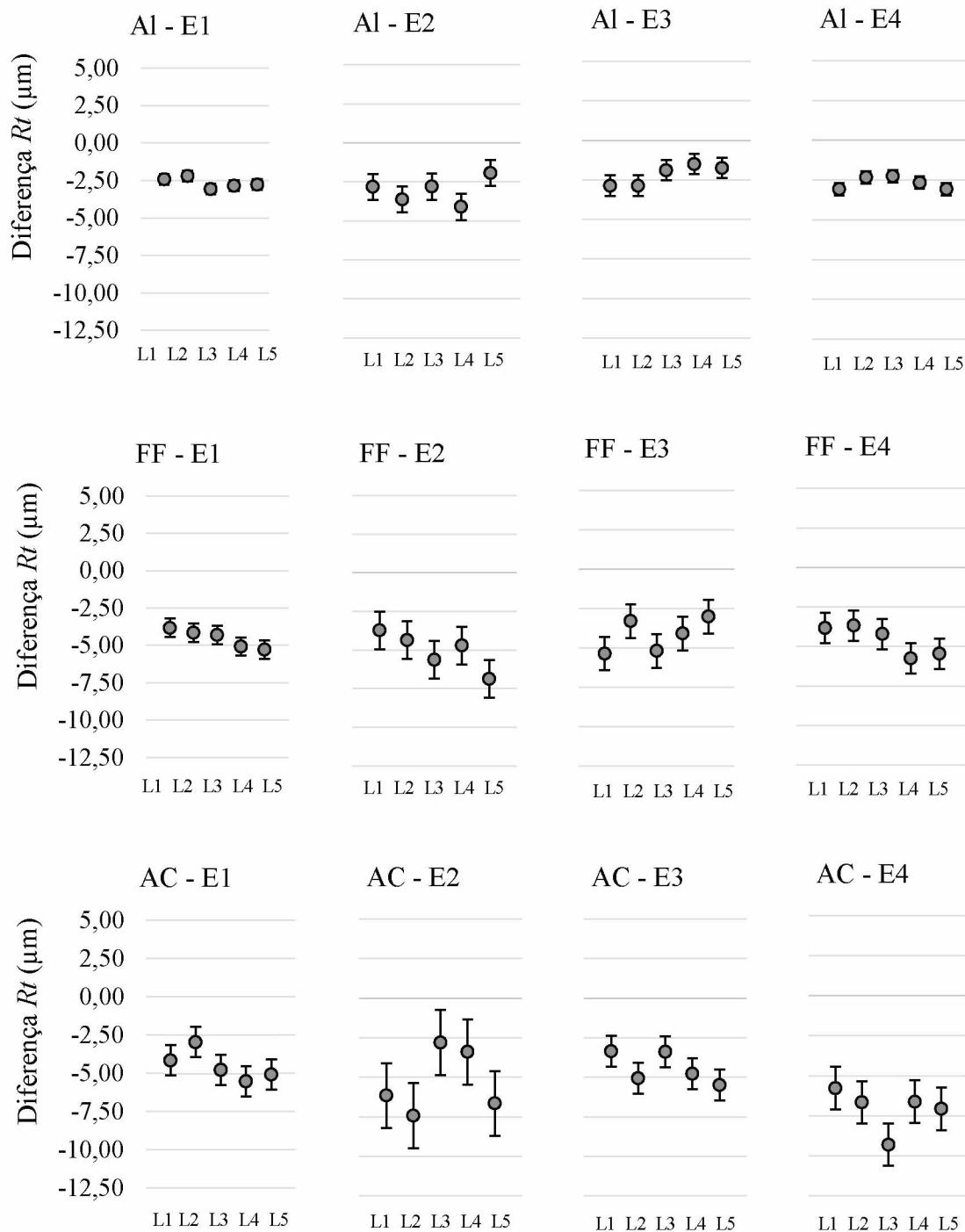


Figura 4.38 - Diferença associada à medição do Rt para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

A diferença percentual entre os valores médios de Rt encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.39 e 4.40, respectivamente.

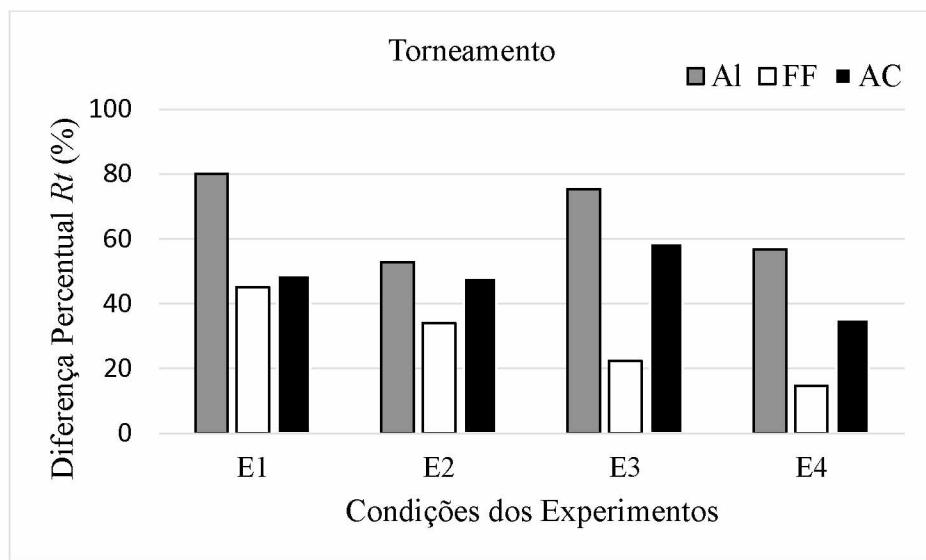


Figura 4.39 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_t para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

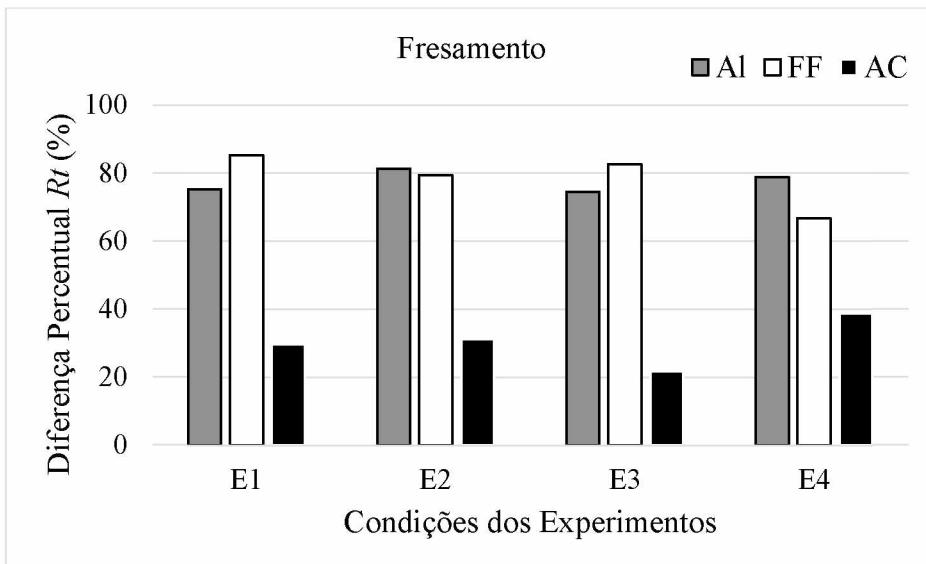


Figura 4.40 - Diferença percentual na medição sem e com contato do R_t para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.39 e 4.40 mostram o que vem se repetindo para os demais parâmetros de rugosidade: os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte. No caso do torneamento (Fig. 4.39), as amostras de FF apresentaram as menores diferenças percentuais ao passo que as amostras de Al exibiram, de modo geral, as maiores. Para o fresamento (Fig. 4.40), as amostras de AC resultaram num melhor desempenho e as de FF e Al em um pior.

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro Rt das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente.

Tabela 4.11 - ANOVA do parâmetro Rt de rugosidade para as amostras torneadas.

Peca	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	610,1525	1	610,1525	6052,569	0,000000
	TM	315,5400	1	315,5400	3130,083	0,000000
	Erro	2,8226	28	0,1008		
AI-E2	Intercepto	1649,212	1	1649,212	11976,26	0,000000
	TM	282,948	1	282,948	2054,72	0,000000
	Erro	3,856	28	0,138		
AI-E3	Intercepto	546,9382	1	546,9382	1323,377	0,000000
	TM	242,8451	1	242,8451	587,591	0,000000
	Erro	11,5721	28	0,4133		
AI-E4	Intercepto	1804,700	1	1804,700	5050,384	0,000000
	TM	330,554	1	330,554	925,042	0,000000
	Erro	10,005	28	0,357		
FF-E1	Intercepto	1774,504	1	1774,504	1721,854	0,000000
	TM	115,120	1	115,120	111,705	0,000000
	Erro	28,856	28	1,031		
FF-E2	Intercepto	5186,499	1	5186,499	4876,238	0,000000
	TM	159,600	1	159,600	150,052	0,000000
	Erro	29,782	28	1,064		
FF-E3	Intercepto	1759,497	1	1759,497	840,8773	0,000000
	TM	6,768	1	6,768	3,2347	0,082884
	Erro	58,589	28	2,092		
FF-E4	Intercepto	6687,069	1	6687,069	1718,901	0,000000
	TM	260,588	1	260,588	66,984	0,000000
	Erro	108,929	28	3,890		
AC-E1	Intercepto	2089,815	1	2089,815	2067,767	0,000000
	TM	278,883	1	278,883	275,941	0,000000
	Erro	28,299	28	1,011		
AC-E2	Intercepto	2134,957	1	2134,957	2697,231	0,000000
	TM	195,680	1	195,680	247,215	0,000000
	Erro	22,163	28	0,792		
AC-E3	Intercepto	2388,318	1	2388,318	3255,085	0,000000
	TM	431,183	1	431,183	587,668	0,000000
	Erro	20,544	28	0,734		
AC-E4	Intercepto	2118,664	1	2118,664	3235,971	0,000000
	TM	167,423	1	167,423	255,716	0,000000
	Erro	18,332	28	0,655		

Tabela 4.12 - ANOVA do parâmetro Rt de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	152,3209	1	152,3209	2254,685	0,000000
	TM	50,1271	1	50,1271	741,991	0,000000
	Erro	1,8916	28	0,0676		
AI-E2	Intercepto	157,2459	1	157,2459	398,7145	0,000000
	TM	64,8363	1	64,8363	164,3997	0,000000
	Erro	11,0427	28	0,3944		
AI-E3	Intercepto	102,6019	1	102,6019	435,9459	0,000000
	TM	34,4331	1	34,4331	146,3033	0,000000
	Erro	6,5899	28	0,2354		
AI-E4	Intercepto	132,9559	1	132,9559	1986,578	0,000000
	TM	50,1709	1	50,1709	749,635	0,000000
	Erro	1,8740	28	0,0669		
FF-E1	Intercepto	327,8987	1	327,8987	1243,371	0,000000
	TM	121,8529	1	121,8529	462,059	0,000000
	Erro	7,3841	28	0,2637		
FF-E2	Intercepto	445,9388	1	445,9388	868,9280	0,000000
	TM	193,1622	1	193,1622	376,3835	0,000000
	Erro	14,3698	28	0,5132		
FF-E3	Intercepto	327,6190	1	327,6190	629,4824	0,000000
	TM	93,8424	1	93,8424	180,3075	0,000000
	Erro	14,5728	28	0,5205		
FF-E4	Intercepto	608,7871	1	608,7871	1043,980	0,000000
	TM	169,0902	1	169,0902	289,965	0,000000
	Erro	16,3279	28	0,5831		
AC-E1	Intercepto	4632,107	1	4632,107	5275,878	0,000000
	TM	215,674	1	215,674	245,649	0,000000
	Erro	24,583	28	0,878		
AC-E2	Intercepto	6082,297	1	6082,297	6754,336	0,000000
	TM	221,646	1	221,646	246,136	0,000000
	Erro	25,214	28	0,901		
AC-E3	Intercepto	10101,47	1	10101,47	16692,57	0,000000
	TM	112,50	1	112,50	185,90	0,000000
	Erro	16,94	28	0,61		
AC-E4	Intercepto	6497,447	1	6497,447	10370,80	0,000000
	TM	395,026	1	395,026	630,52	0,000000
	Erro	17,542	28	0,627		

Pelas Tabelas 4.11 e 4.12, comprova-se que o método de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rt em quase todos os casos investigados. Tal efeito apenas não foi comprovado para as amostras torneadas de FF na condição E3, em que a variação das leituras deste parâmetro não foi expressiva para causar tais

efeitos. Esta condição foi a mesma para o Rv em que não conseguiu comprovar a influência do método de medição, destacando a relação existente entre os parâmetros.

O quadro de ANOVA completo para o Rt é exibido no APÊNDICE II.

4.2.7 Fator de assimetria do perfil de rugosidade (Rsk)

Os valores médios de Rsk obtidos na medição sem contato e com contato são exibidos nas Figs 4.41 e 4.42, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Na Figura 4.41, relativa ao processo de torneamento, observa-se que os valores médios encontrados para o parâmetro Rsk na medição por interferometria são maiores do que os encontrados na medição com contato para as amostras de Al. Para as amostras de FF todos os valores de Rsk encontrados na medição com contato foram superiores, enquanto que para o AC cada tipo de medição forneceu valores maiores em 50% dos casos, não havendo tendência dominante. Por outro lado, para o fresamento na Fig. 4.42, os valores médios desse mesmo parâmetro não apresentam um padrão definido de modo a indicar em qual tipo de medição (sem ou com contato) foram obtidos os maiores valores.

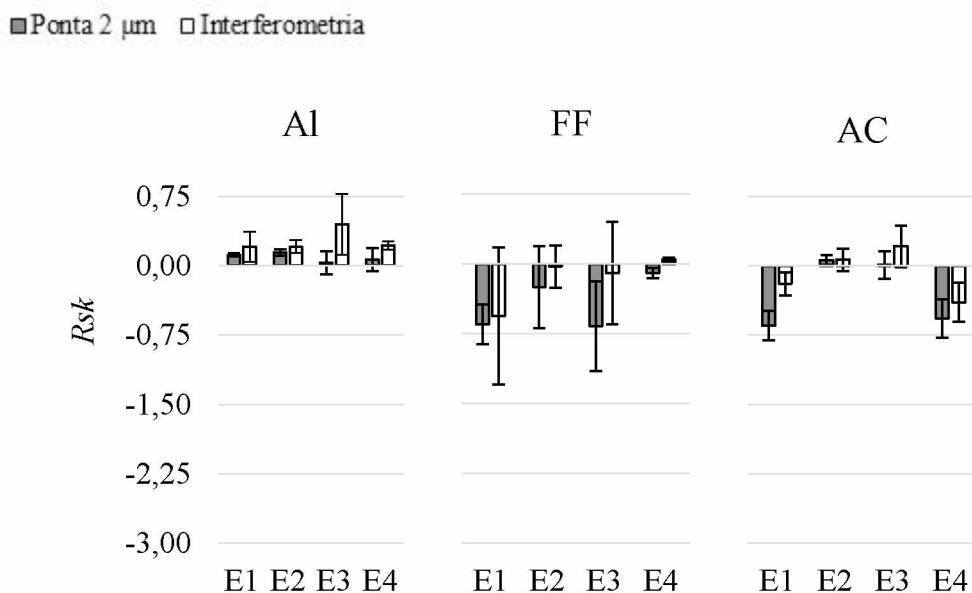


Figura 4.41 - Valores médios do parâmetro Rsk para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

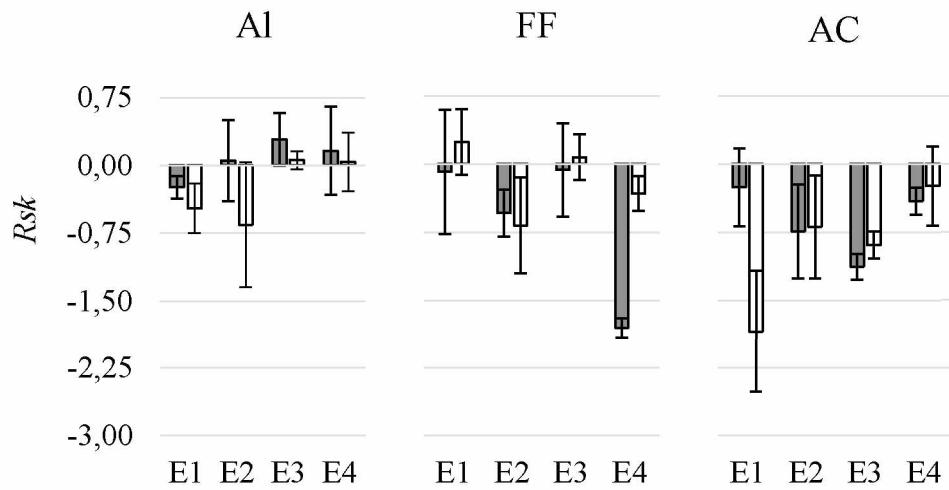


Figura 4.42 - Valores médios do parâmetro Rsk para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores de Rsk próximos a 0 (zero) indicam que o perfil de rugosidade apresenta uma simetria semelhante ao modelo normal, como pode ser observado para as amostras torneadas de AC na condição E2. Por outro lado, os valores superiores a 0, encontrados para as amostras torneadas de Al, revelam a maior presença de picos no perfil, de modo que os valores inferiores a 0, visto para as amostras fresadas de AC, por exemplo, sugerem a maior presença de vales.

Apesar da sua característica de parâmetro de forma, o Rsk precisa ser associado a outros parâmetros para uma adequada caracterização do perfil de rugosidade.

Os valores de incerteza de medição encontrados nas Figs. 4.41 e 4.42 são significativos, superando em várias condições o valor médio do parâmetro. Este fato mostra a sensibilidade deste parâmetro em função da não homogeneidade do acabamento superficial das amostras para ambos os tipos de medição. Como esperado, a repetibilidade dos valores de Rsk é baixa.

A diferença entre as leituras médias obtidas durante a medição do parâmetro Rsk para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.43 e 4.44, respectivamente. Nestas figuras, as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

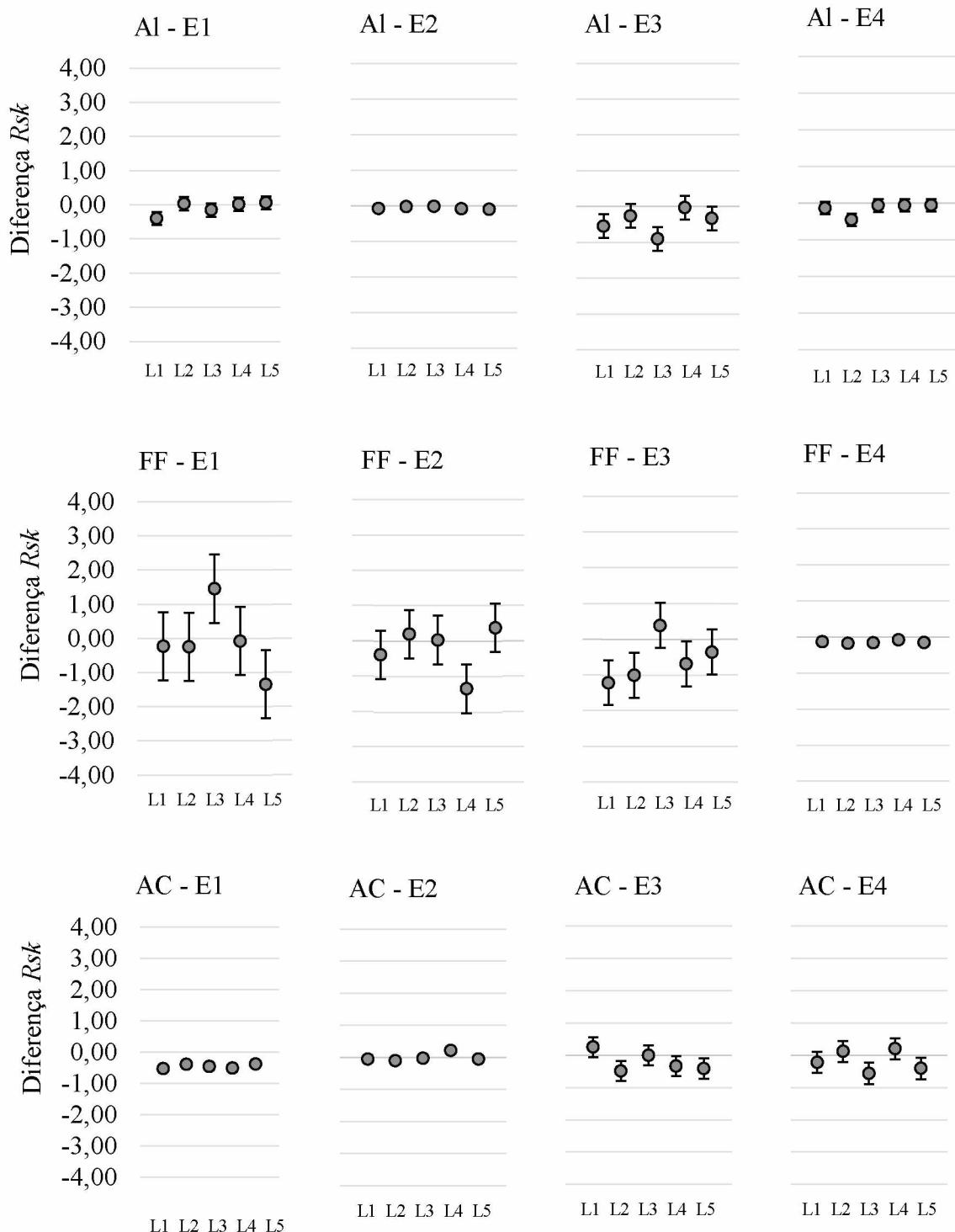


Figura 4.43 - Diferença associada à medição do Rsk para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

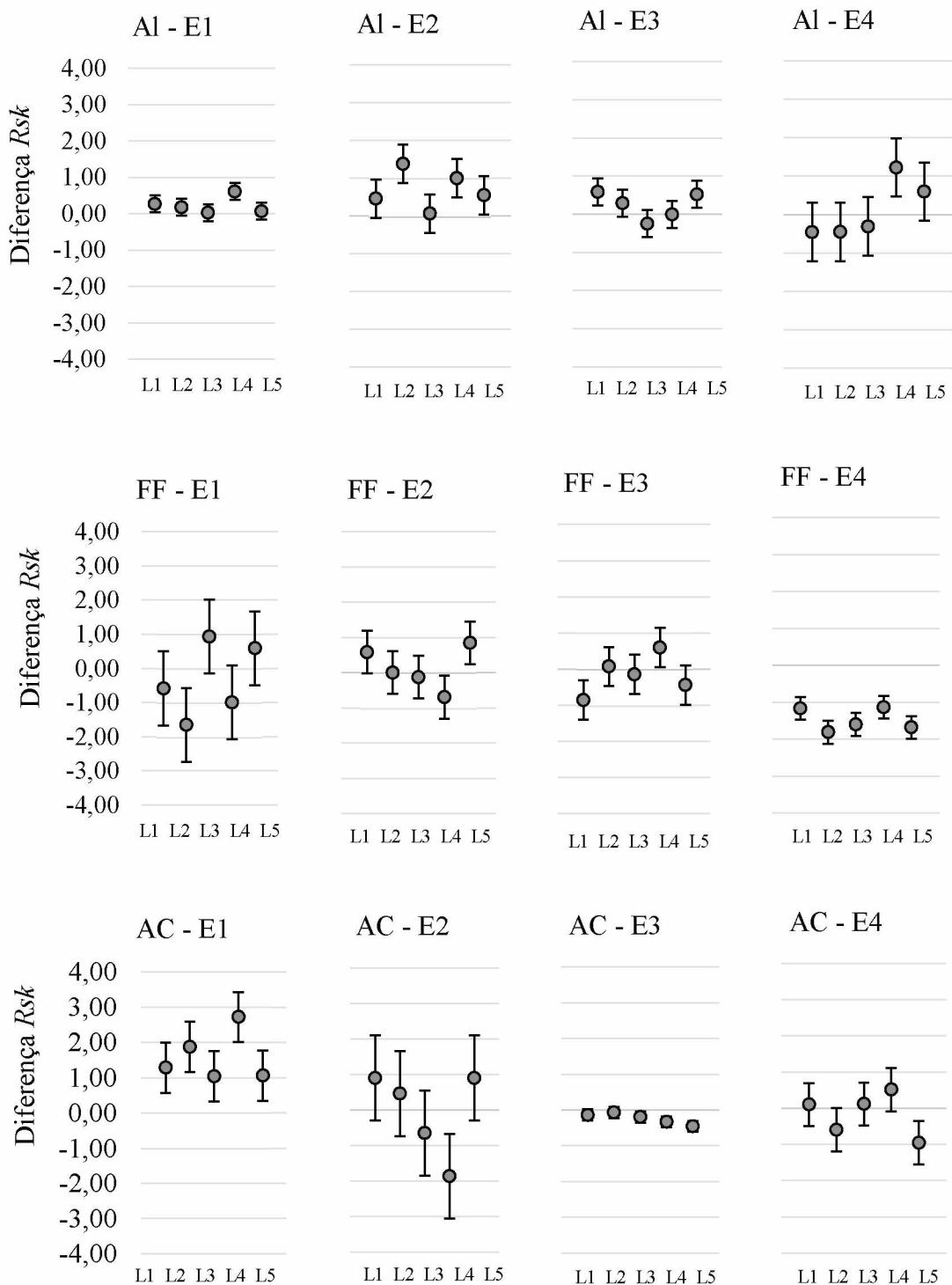


Figura 4.44 - Diferença associada à medição do Rsk para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

Na Figura 4.43, para as amostras torneadas, o maior valor de diferença, em módulo, de Rsk foi encontrado para as amostras de FF na condição E1 e igual a 1,34. Já para o fresamento,

na Fig. 4.44, tal valor foi obtido para as amostras de AC na condição E2, sendo igual a 1,86. Nota-se que para o Al, tanto no torneamento quanto no fresamento, as diferenças independentemente da condição de corte, mantiveram-se numa mesma faixa de valores próximos de zero, de modo que o desvio padrão das leituras foi baixo. Este comportamento também é encontrado para as amostras de AC torneadas.

Os maiores valores de desvio padrão, exibidos por meio da barra de erros nas Figs. 4.43 e 4.44, refletem a baixa repetibilidade dos valores de diferença em virtude da baixa repetibilidade dos resultados obtidos em ambos os tipos de medição. Porém, em casos como as amostras de Al na condição E2, encontram-se valores de desvio padrão muito baixos, indicando uma melhor precisão das leituras.

A diferença percentual entre os valores médios de Rsk encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.45 e 4.46, respectivamente.

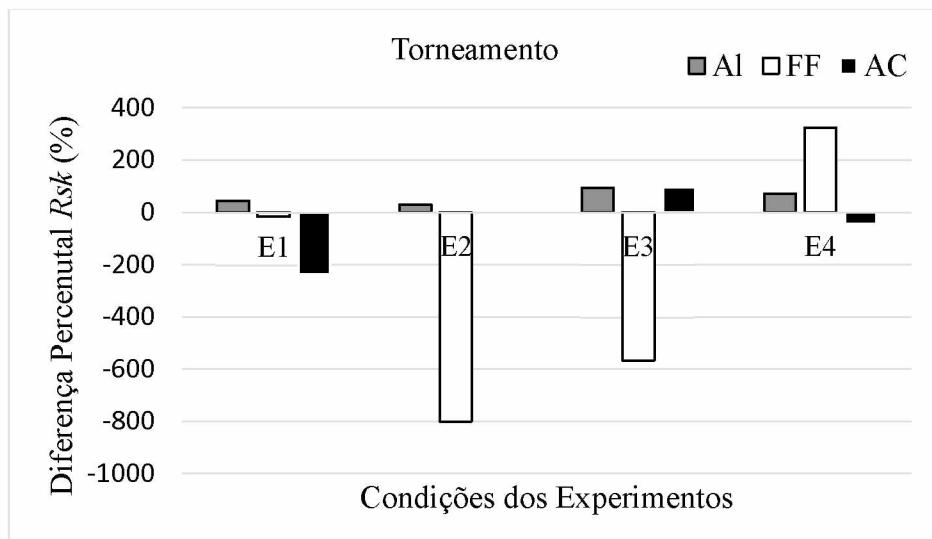


Figura 4.45 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rsk para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

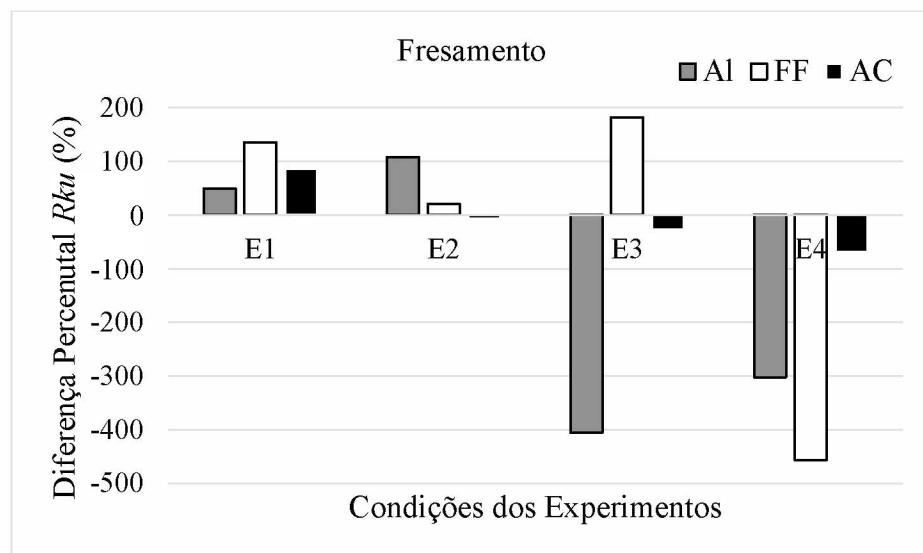


Figura 4.46 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rsk para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.45 e 4.46 mostram que os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte. Todavia, a variação nas variáveis de entrada não segue uma tendência de resultados, o que dificulta estimar um comportamento comum para o parâmetro Rsk . As barras negativas indicam que a medição com contato forneceu valores maiores do que a medição sem contato.

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro Rsk das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente.

Tabela 4.13 - ANOVA do parâmetro *Rsk* de rugosidade para as amostras torneadas.

Peca	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	2,203888	1	2,203888	75,86204	0,000000
	TM	0,129624	1	0,129624	4,46191	0,043708
	Erro	0,813435	28	0,029051		
AI-E2	Intercepto	3,811080	1	3,811080	98,16662	0,000000
	TM	0,690195	1	0,690195	17,77818	0,000235
	Erro	1,087032	28	0,038823		
AI-E3	Intercepto	4,625078	1	4,625078	49,74027	0,000000
	TM	0,077411	1	0,077411	0,83251	0,369336
	Erro	2,603568	28	0,092985		
AI-E4	Intercepto	3,631375	1	3,631375	71,51349	0,000000
	TM	0,510048	1	0,510048	10,04450	0,003680
	Erro	1,421809	28	0,050779		
FF-E1	Intercepto	7,488401	1	7,488401	23,29283	0,000045
	TM	0,114312	1	0,114312	0,35557	0,555767
	Erro	9,001708	28	0,321490		
FF-E2	Intercepto	0,740217	1	0,740217	9,553426	0,004481
	TM	0,502285	1	0,502285	6,482613	0,016681
	Erro	2,169491	28	0,077482		
FF-E3	Intercepto	1,193207	1	1,193207	3,877670	0,058901
	TM	0,289927	1	0,289927	0,942202	0,340023
	Erro	8,615948	28	0,307712		
FF-E4	Intercepto	0,114139	1	0,114139	6,701262	0,015110
	TM	0,009916	1	0,009916	0,582205	0,451831
	Erro	0,476909	28	0,017032		
AC-E1	Intercepto	2,670200	1	2,670200	42,95906	0,000000
	TM	0,318724	1	0,318724	5,12774	0,031481
	Erro	1,740392	28	0,062157		
AC-E2	Intercepto	0,054108	1	0,054108	3,683612	0,065194
	TM	0,013796	1	0,013796	0,939238	0,340771
	Erro	0,411285	28	0,014689		
AC-E3	Intercepto	0,028655	1	0,028655	0,555580	0,462172
	TM	0,968607	1	0,968607	18,78750	0,000170
	Erro	1,443565	28	0,051556		
AC-E4	Intercepto	3,036962	1	3,036962	48,41297	0,000000
	TM	0,173751	1	0,173751	2,76981	0,107211
	Erro	1,756450	28	0,062730		

Tabela 4.14 - ANOVA do parâmetro Rsk de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	0,707736	1	0,707736	7,29428	0,011607
	TM	3,077396	1	3,077396	31,71718	0,000005
	Erro	2,716732	28	0,097026		
AI-E2	Intercepto	3,859389	1	3,859389	11,94578	0,001766
	TM	2,657014	1	2,657014	8,22413	0,007770
	Erro	9,046116	28	0,323076		
AI-E3	Intercepto	0,481545	1	0,481545	5,687968	0,024092
	TM	0,147528	1	0,147528	1,742585	0,197502
	Erro	2,370487	28	0,084660		
AI-E4	Intercepto	1,612448	1	1,612448	7,120569	0,012531
	TM	2,218921	1	2,218921	9,798753	0,004059
	Erro	6,340581	28	0,226449		
FF-E1	Intercepto	0,339028	1	0,339028	0,96429	0,334518
	TM	3,638150	1	3,638150	10,34790	0,003263
	Erro	9,844336	28	0,351583		
FF-E2	Intercepto	8,380143	1	8,380143	43,63472	0,000000
	TM	0,631195	1	0,631195	3,28658	0,080583
	Erro	5,377461	28	0,192052		
FF-E3	Intercepto	0,501518	1	0,501518	2,454789	0,128400
	TM	1,261218	1	1,261218	6,173309	0,019217
	Erro	5,720451	28	0,204302		
FF-E4	Intercepto	38,21772	1	38,21772	460,4242	0,000000
	TM	19,45609	1	19,45609	234,3954	0,000000
	Erro	2,32415	28	0,08301		
AC-E1	Intercepto	50,36466	1	50,36466	132,0057	0,000000
	TM	9,03216	1	9,03216	23,6733	0,000040
	Erro	10,68295	28	0,38153		
AC-E2	Intercepto	12,49278	1	12,49278	44,36126	0,000000
	TM	0,05541	1	0,05541	0,19676	0,660755
	Erro	7,88521	28	0,28161		
AC-E3	Intercepto	21,37763	1	21,37763	426,1493	0,000000
	TM	0,06764	1	0,06764	1,3483	0,255378
	Erro	1,40461	28	0,05016		
AC-E4	Intercepto	3,818242	1	3,818242	28,02158	0,000012
	TM	0,409764	1	0,409764	3,00720	0,093894
	Erro	3,815301	28	0,136261		

Pelas Tabelas 4.11 e 4.12, comprova-se que o método de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rsk em alguns casos investigados. Este parâmetro, diferente dos vistos acima, apresenta comportamento distinto em relação ao tipo de medição, uma vez que a influência desta variável não é expressiva e a variação das leituras encontrados não foi capaz de provocar tais efeitos. Os casos em que não

foram possíveis comprovar o efeito do método de medição são: para as amostras torneadas de Al na condição E1, FF nas condições E1, E3 e E4 e AC nas condições E2 e E4; para as amostras fresadas de Al na condição E3, FF na condição E2 e AC nas condições E2, E3 e E4.

O quadro de ANOVA completo para o R_{sk} é exibido no APÊNDICE II.

4.2.8 Fator de achatamento do perfil de rugosidade (R_{ku})

Os valores médios de R_{ku} encontrados na medição sem contato e com contato são exibidos nas Figs 4.47 e 4.48, para as amostras torneadas e fresadas, respectivamente, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores médios encontrados para o parâmetro R_{ku} na medição sem contato das amostras analisadas foram todos maiores quando comparados com os obtidos na medição com contato. No torneamento (Fig. 4.47), o maior valor médio encontrado para a Kurtosis na medição sem contato foi igual a 7,62, em amostras de FF na condição E1. Já na Figura 4.48, para o fresamento, tal valor foi igual a 7,81 também para amostras de FF, mas na condição E2.

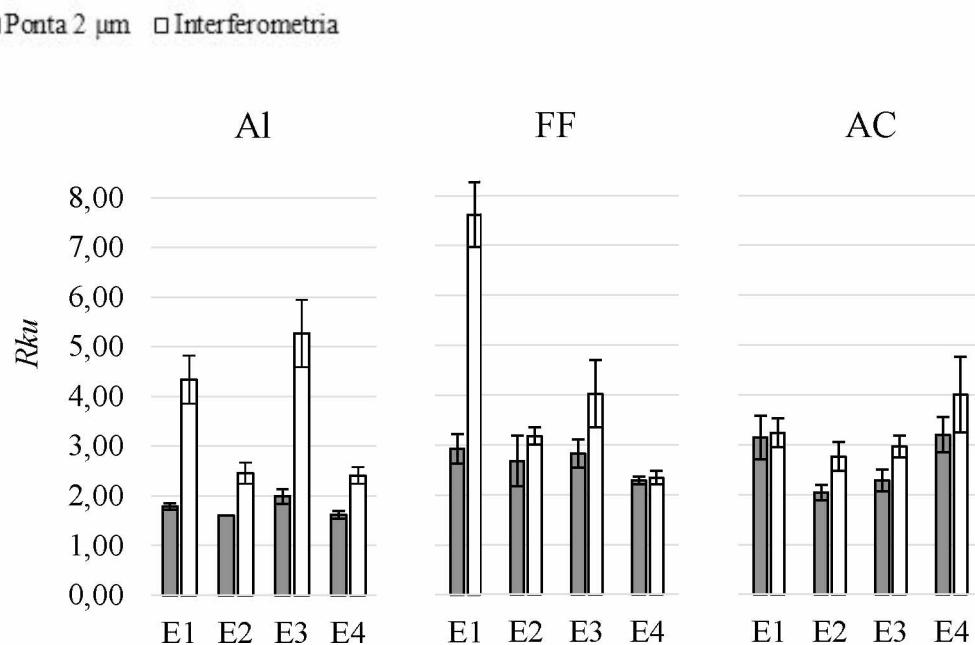


Figura 4.47 - Valores médios do parâmetro R_{ku} para as amostras torneadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

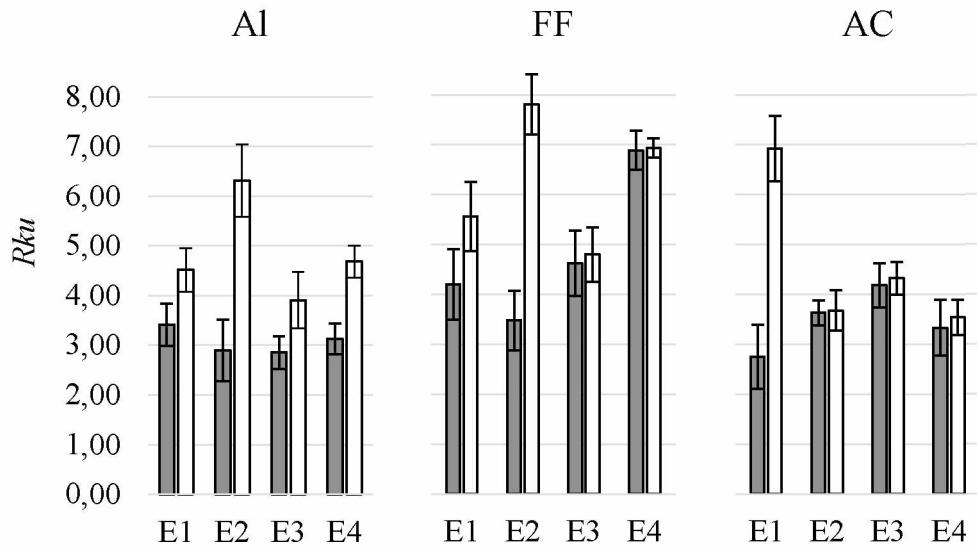


Figura 4.48 - Valores médios do parâmetro R_{ku} para as amostras fresadas nas condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

Os valores de R_{ku} próximos a 3 (três) indicam que o perfil de rugosidade apresenta um achatamento semelhante ao modelo normal, como pode ser observado para as amostras torneadas de AC. Por outro lado, os valores superiores a 3, encontrados para a maioria das amostras fresadas de FF e AC, indicam que as extremidades das reentrâncias têm o formato “afunilado”, ou “espelhado”, ou seja, no perfil de rugosidade há relativamente muitos vales profundos e/ou picos finos. Já valores menores do que 3, obtidos para a maioria dos casos nas amostras torneadas na medição com contato revelam a presença de picos e/ou vales mais arredondados, característico de uma superfície do tipo platô.

Deste modo, destaca-se que, assim como o R_{sk} , o parâmetro R_{ku} precisa ser associado a outros parâmetros para uma adequada caracterização do perfil de rugosidade.

Os valores de incerteza de medição encontrados na medição com contato das amostras no fresamento foram, em geral, da mesma ordem de grandeza que os encontrados na medição sem contato para o mesmo processo, diferente do que ocorreu para o processo de torneamento, em que na maioria dos casos a medição sem contato forneceu maiores valores de incerteza de medição do que a medição com contato. Este fato mostra a influência do processo de usinagem adotado no parâmetro R_{ku} , destacando, também, a não homogeneidade do acabamento superficial das amostras.

A diferença entre as leituras médias encontrada durante a medição do parâmetro R_{ku} para cada condição de corte investigada no torneamento e no fresamento é exibido nas Figs. 4.49 e

4.50, respectivamente. Nestas figuras, as barras de erros representam o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27%.

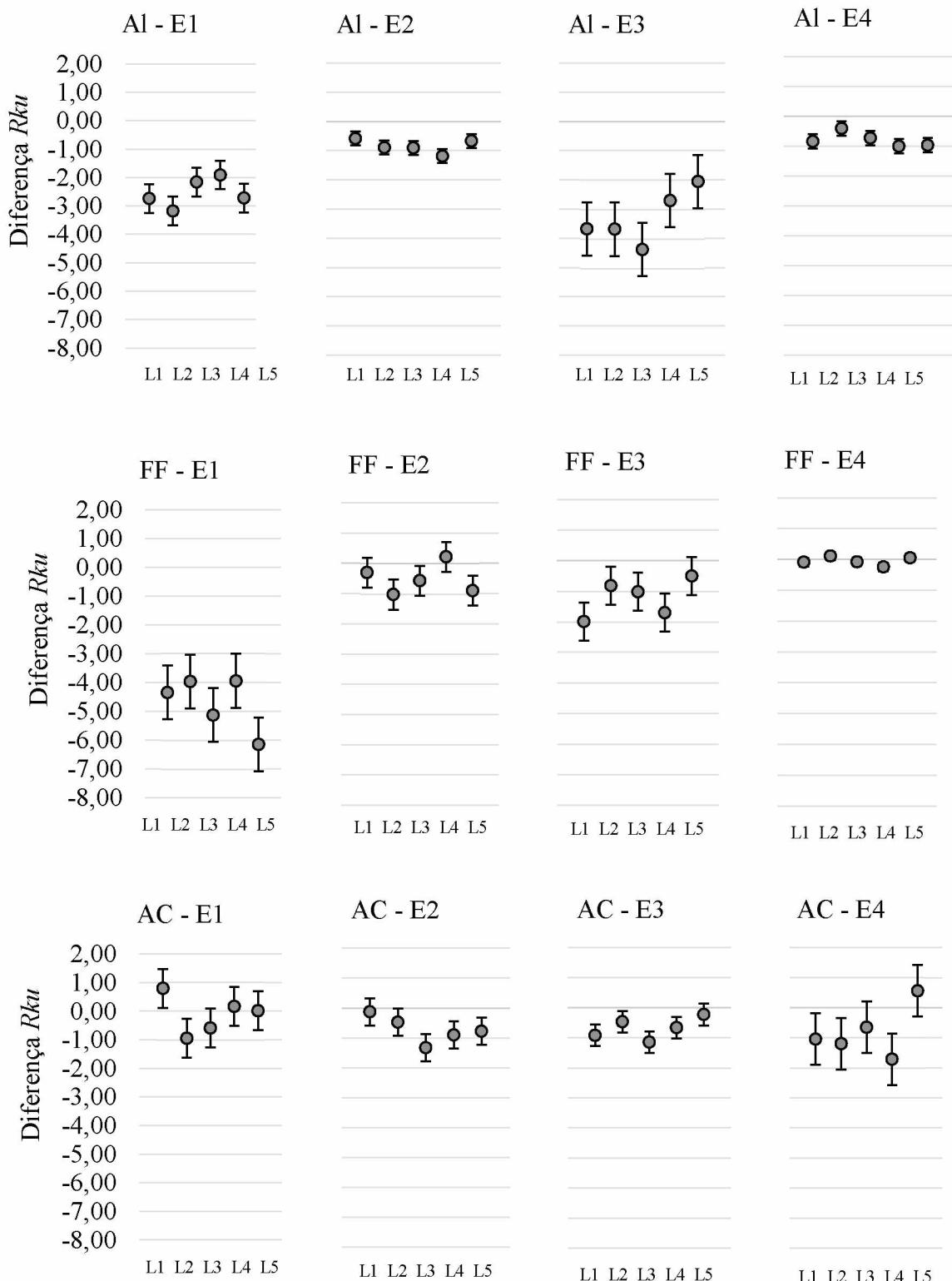


Figura 4.49 - Diferença associada à medição do R_{ku} para as amostras torneadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

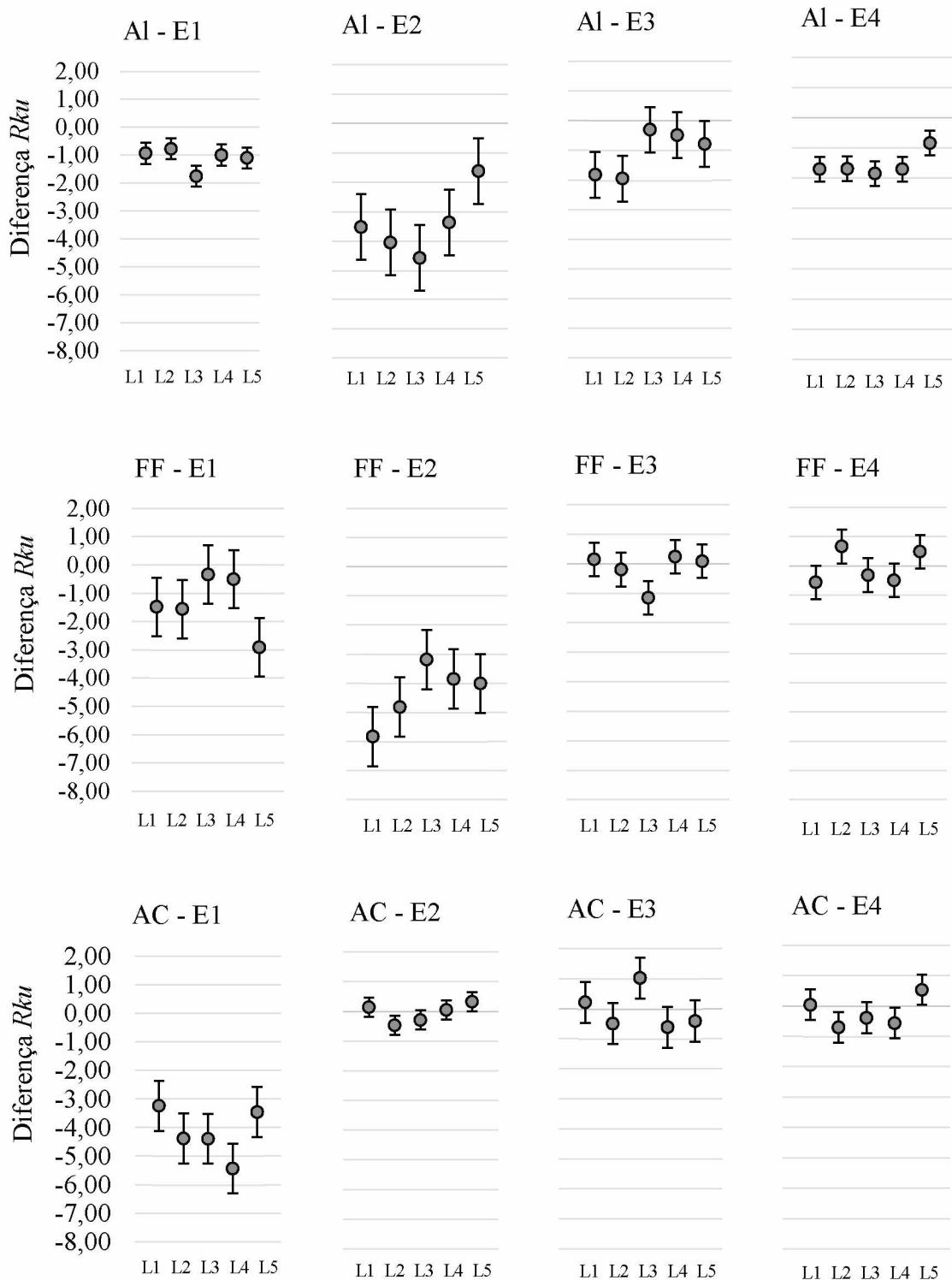


Figura 4.50 - Diferença associada à medição do R_{ku} para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

Os maiores valores de diferença, em módulo, de R_{ku} foram observados para as amostras de FF, tanto para o torneamento quanto para o fresamento, sendo na Fig. 4.49 igual a 6,13 na

condição E1 e na Fig. 4.50 igual a 5,82 na condição E2. É possível visualizar que em alguns casos, como nas amostras fresadas de AC, os parâmetros de corte considerados influenciam nos valores de diferença encontrados, uma vez que a condição E1 fornece maiores valores de erro ao passo que as demais este valor mantém-se praticamente numa mesma faixa.

Os maiores valores de desvio padrão, exibidos por meio da barra de erros nas Figs. 4.49 e 4.50, indicam a baixa repetibilidade dos valores de diferença em virtude da baixa repetibilidade dos resultados obtidos na medição sem contato. Analisando as amostras torneadas de A1 e FF, ambas na condição E4, nota-se valores de desvio padrão baixos, o que indica que para estas amostras a precisão das leituras foi melhor.

A diferença percentual entre os valores médios de Rku encontrados pela medição sem contato (adotada como referência) e com contato, no torneamento e fresamento, é mostrada nas Figs. 4.51 e 4.52, respectivamente.

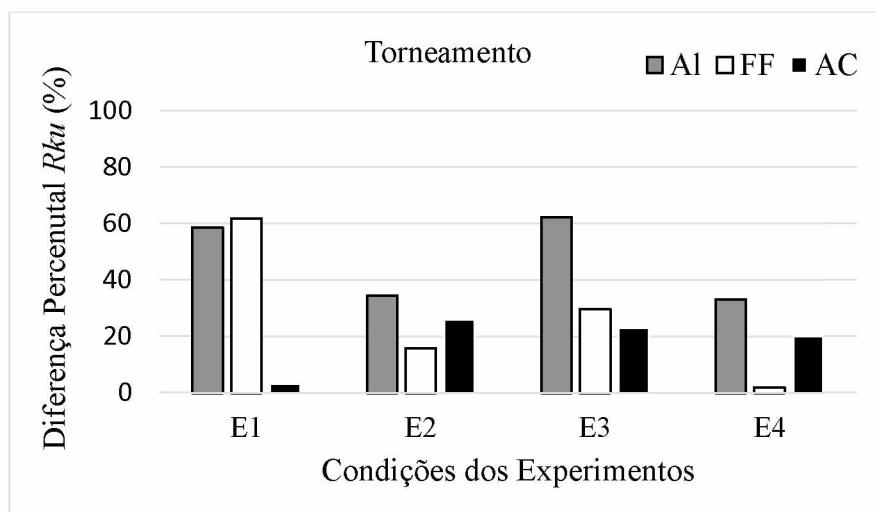


Figura 4.51 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rku para as amostras torneadas de A1, FF e AC nas condições de corte investigadas.

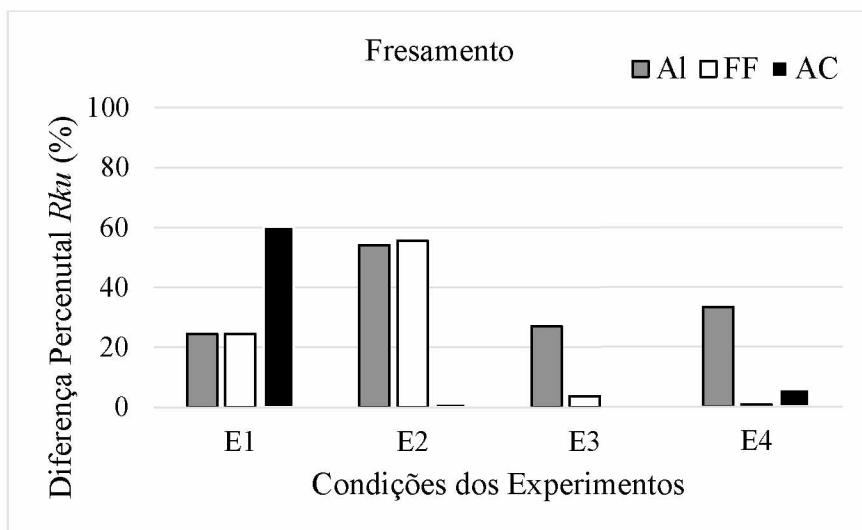


Figura 4.52 - Diferença percentual na medição sem e com contato do Rku para as amostras fresadas de Al, FF e AC nas condições de corte investigadas.

As Figuras 4.51 e 4.52 mostram que os valores de diferença percentual sofrem influência dos materiais avaliados, dos processos de usinagem e dos parâmetros de corte. Porém, não é possível estipular qual material para uma condição específica obteve um melhor desempenho, visto que a variação deste parâmetro de acordo com as mudanças das variáveis de entrada não segue uma tendência de resultados.

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos na análise de variância para o parâmetro Rku das amostras de Al, FF e AC, em cada condição investigada, para os processos de torneamento e fresamento, respectivamente. Pelas tabelas, comprova-se que o método de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores médios do parâmetro Rku em quase todos os casos investigados. Tal efeito apenas não foi comprovado para as amostras torneadas de FF na condição E4 e AC na condição E1, e nas amostras fresadas de FF na condição E1 e na condição E1 e de AC na condição E2 na condição E4. Nestes casos específicos, a variação das leituras deste parâmetro não foi expressiva para causar tais efeitos.

O quadro de ANOVA completo para o Rku é exibido no APÊNDICE II.

Tabela 4.15 - ANOVA do parâmetro Rku de rugosidade para as amostras torneadas.

Peca	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	P-valor
AI-E1	Intercepto	315,3361	1	315,3361	1926,010	0,000000
	TM	36,0868	1	36,0868	220,411	0,000000
	Erro	4,5843	28	0,1637		
AI-E2	Intercepto	139,2116	1	139,2116	3288,757	0,000000
	TM	2,6550	1	2,6550	62,722	0,000000
	Erro	1,1852	28	0,0423		
AI-E3	Intercepto	430,5382	1	430,5382	1539,188	0,000000
	TM	65,7985	1	65,7985	235,232	0,000000
	Erro	7,8321	28	0,2797		
AI-E4	Intercepto	137,6478	1	137,6478	4027,268	0,000000
	TM	2,1766	1	2,1766	63,682	0,000000
	Erro	0,9570	28	0,0342		
FF-E1	Intercepto	810,7921	1	810,7921	2627,198	0,000000
	TM	175,9862	1	175,9862	570,246	0,000000
	Erro	8,6412	28	0,3086		
FF-E2	Intercepto	257,1323	1	257,1323	2478,782	0,000000
	TM	1,8596	1	1,8596	17,927	0,000224
	Erro	2,9045	28	0,1037		
FF-E3	Intercepto	331,4350	1	331,4350	1055,160	0,000000
	TM	14,6089	1	14,6089	46,509	0,000000
	Erro	8,7950	28	0,3141		
FF-E4	Intercepto	164,0382	1	164,0382	11489,65	0,000000
	TM	0,0000	1	0,0000	0,00	0,098896
	Erro	0,3998	28	0,0143		
AC-E1	Intercepto	288,8319	1	288,8319	1225,730	0,000000
	TM	0,6949	1	0,6949	2,949	0,096982
	Erro	6,5979	28	0,2356		
AC-E2	Intercepto	171,7220	1	171,7220	3183,891	0,000000
	TM	4,1627	1	4,1627	77,181	0,000000
	Erro	1,5102	28	0,0539		
AC-E3	Intercepto	236,3353	1	236,3353	2238,128	0,000000
	TM	0,7624	1	0,7624	7,220	0,011992
	Erro	2,9567	28	0,1056		
AC-E4	Intercepto	298,3226	1	298,3226	541,6883	0,000000
	TM	22,0210	1	22,0210	39,9853	0,000001
	Erro	15,4204	28	0,5507		

Tabela 4.16 - ANOVA do parâmetro Rku de rugosidade para as amostras fresadas.

Peça	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
AI-E1	Intercepto	519,5393	1	519,5393	960,3948	0,000000
	TM	3,8196	1	3,8196	7,0608	0,012867
	Erro	15,1470	28	0,5410		
AI-E2	Intercepto	618,5413	1	618,5413	1328,373	0,000000
	TM	94,3459	1	94,3459	202,616	0,000000
	Erro	13,0379	28	0,4656		
AI-E3	Intercepto	354,5349	1	354,5349	1096,083	0,000000
	TM	6,6752	1	6,6752	20,637	0,000097
	Erro	9,0568	28	0,3235		
AI-E4	Intercepto	515,4587	1	515,4587	1465,632	0,000000
	TM	8,6977	1	8,6977	24,731	0,000030
	Erro	9,8475	28	0,3517		
FF-E1	Intercepto	820,5183	1	820,5183	462,4465	0,000000
	TM	3,2627	1	3,2627	1,8388	0,185922
	Erro	49,6804	28	1,7743		
FF-E2	Intercepto	1033,495	1	1033,495	1107,328	0,000000
	TM	113,226	1	113,226	121,315	0,000000
	Erro	26,133	28	0,933		
FF-E3	Intercepto	638,1357	1	638,1357	1540,868	0,000000
	TM	1,0387	1	1,0387	2,508	0,124501
	Erro	11,5959	28	0,4141		
FF-E4	Intercepto	2087,341	1	2087,341	409,8317	0,000000
	TM	75,588	1	75,588	14,8410	0,000623
	Erro	142,609	28	5,093		
AC-E1	Intercepto	845,1687	1	845,1687	1121,386	0,000000
	TM	78,5789	1	78,5789	104,260	0,000000
	Erro	21,1031	28	0,7537		
AC-E2	Intercepto	398,8842	1	398,8842	1089,505	0,000000
	TM	0,0302	1	0,0302	0,082	0,776119
	Erro	10,2512	28	0,3661		
AC-E3	Intercepto	456,7072	1	456,7072	1836,388	0,000000
	TM	3,0798	1	3,0798	12,384	0,001500
	Erro	6,9636	28	0,2487		
AC-E4	Intercepto	372,5736	1	372,5736	985,4680	0,000000
	TM	0,0071	1	0,0071	0,0188	0,891794
	Erro	10,5859	28	0,3781		

4.3 Análise Final

As Figuras 4.53 e 4.54 mostram os valores médios de diferença percentual para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_v , R_z e R_t obtidos na medição das amostras de Al, FF e AC torneadas e fresadas considerando as quatro condições de corte investigadas. Não foram apresentados os parâmetros R_{sk} e R_{ku} porque não apresentam uma tendência definida.

Observa-se que todos os parâmetros obtidos nas amostras de Al torneadas (Fig. 4.53a) foram significativamente influenciados pelos parâmetros de corte, em particular pelo avanço. O parâmetro R_a exibiu valores de diferença percentual de 48%, 10%, 46% e 21% para as condições E1, E2, E3 e E4, respectivamente. Por sua vez, para o R_q foram observados os seguintes valores: 55%, 14%, 54% e 25%. Para os demais parâmetros, R_p , R_v , R_z e R_t , os valores de diferença percentual são similares e próximos de 75%, 45%, 70% e 50%. Foi observada uma expressiva variabilidade nos valores de diferença percentual dos valores dos parâmetros de rugosidade obtidos nas amostras de FF e AC torneadas (Figs 4.53b e 4.53c) para as diferentes condições de corte investigadas.

No fresamento do alumínio (Fig. 4.54a) se observou que os parâmetros R_a e R_q apresentam um comportamento similar (55% de diferença percentual), sendo esta diferença pouco influenciada pelas diferentes condições de corte investigadas. O mesmo foi observado para os parâmetros R_p , R_v , R_z e R_t onde a diferença percentual foi da ordem de 75% para todas as condições investigadas. No fresamento do FF os valores de diferença percentual são da ordem de 70% para o R_a e R_q , e de 80% para os demais parâmetros. Enquanto que para o AC se observou novamente o efeito significativo das condições de corte.

Nas condições experimentais deste trabalho foram observados resultados diferentes aos encontrados por Vorburger et al., (2007). De acordo com estes autores as diferenças encontradas para o parâmetro R_a (na faixa de 50 nm a 300 nm) usando medição com e sem contato foram da ordem de 75%. Neste trabalho estas diferenças são bem menores para as amostras torneadas e fresadas. Ainda Vorburger et al., (2007) concluíram que para valores de R_a da ordem de 500 nm ambos os métodos de medição forneceram valores de R_a similares. Neste trabalho se observou que estas diferenças podem ultrapassar 40% para as amostras de Al e AC durante o torneamento com avanço de 0,1 mm/rot, por sua vez, no fresamento estas são de 50% para o Al, de até 80% para o FF e de até 25% para o aço carbono.

Maiores estudos deverão ser conduzidos com o intuito de compreender melhor o efeito da ponta do apalpador nos valores de rugosidade.

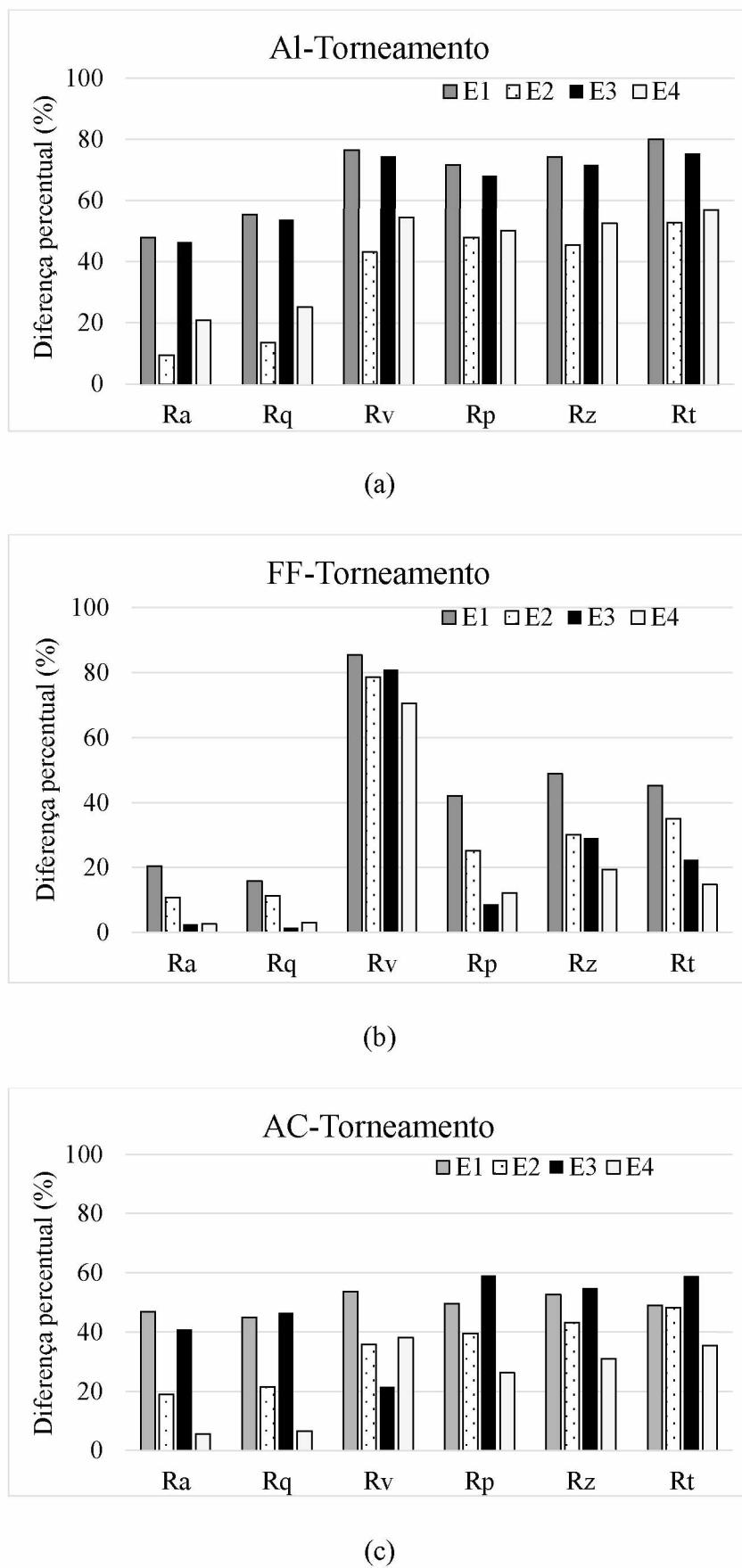


Figura 4.53 – Valores de diferença percentual para o torneamento.

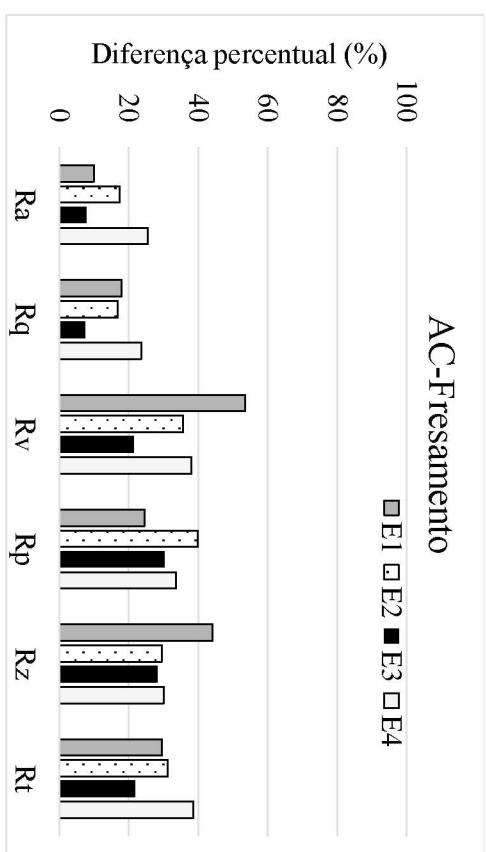
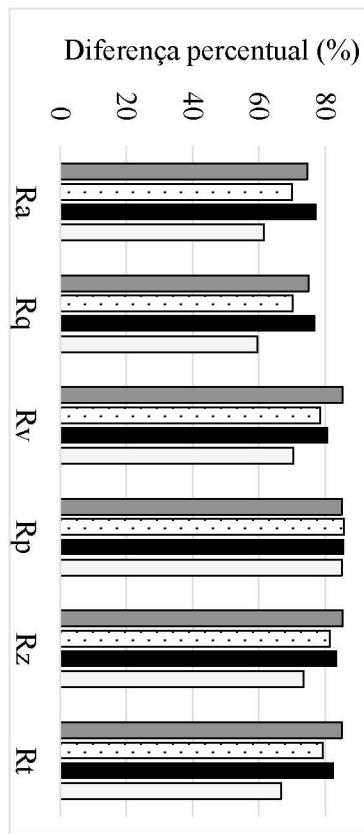
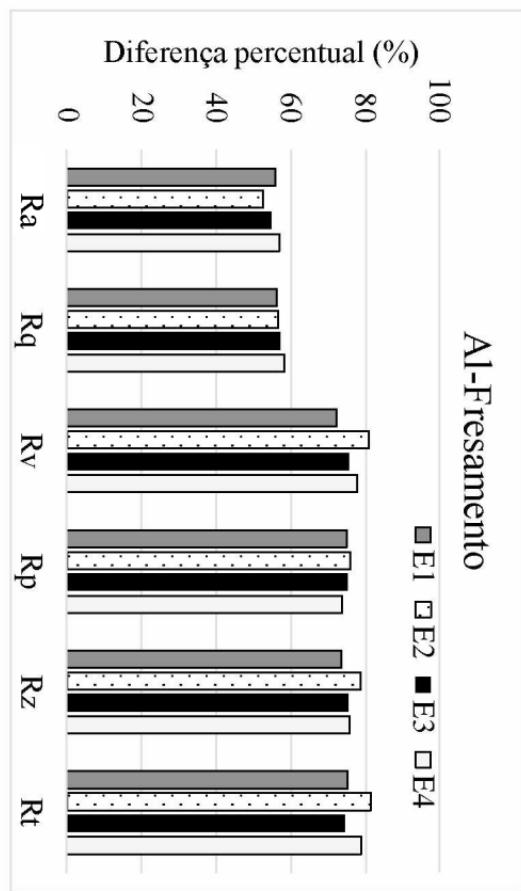


Figura 4.54 – Valores de diferença percentual para o fresamento.



(a)

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

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

- Os valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_p , R_v , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku} dependem dos materiais avaliados, do processo de usinagem, das condições de corte e do tipo de medição utilizado.
 - Os valores médios dos parâmetros R_a , R_q , R_p , R_v , R_z , R_t e R_{ku} obtidos na medição sem contato das amostras de Al, FF e AC torneadas e fresadas com diferentes condições de corte foram maiores do que os encontrados na medição com contato. Evidencia-se que o raio da ponta do apalpador constitui uma fonte significativa de erros. Para o parâmetro R_{sk} não foi observada nenhuma tendência dominante entre os dois tipos de medição.
 - Os valores de incerteza expandida associados à medição sem contato, em geral, foram maiores do que os associados à medição com contato. Tal fato pode ser atribuído à distorção da luz refletida quando incidente em superfícies rugosas durante a medição por interferometria associada à sensibilidade deste tipo de medição em identificar alterações microsuperficiais oriundas dos processos de usinagem, bem como poros.
 - Os valores de diferença entre as leituras médias obtidas durante a medição sem contato e com contato e o desvio padrão associado a essas leituras, indicaram a falta de homogeneidade superficial das amostras e ressaltaram a baixa repetibilidade dos valores encontrados na medição sem contato.
 - No torneamento do Al, FF e AC os valores de diferença percentual encontrados variaram de forma significativa com as mudanças nas condições de corte. Esta diferença tendeu a ser maior para as condições E1 e E3 que foram executadas com o menor avanço.

- No fresamento do Al, as diferenças percentuais entre os valores médios dos parâmetros R_a e R_q foram da ordem de 55%, já para o R_p , R_v , R_z e R_t esta diferença foi próxima de 75%. No fresamento do FF, os valores de diferença percentual são da ordem de 70% para o R_a e R_q , e de 80% para os parâmetros R_p , R_v , R_z e R_t . Para o AC, os valores de diferença percentual variaram de forma significativa com as condições de corte utilizadas não sendo possível apresentar valores gerais.

- Os resultados da ANOVA mostraram que há diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios encontrados para todos os parâmetros de rugosidade analisados nas condições de corte investigadas para os três materiais e os dois processos de usinagem considerados.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros.

- Avaliar o grau de deterioração da superfície das amostras quando medidas com rugosímetro eletromecânico, usando o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).
- Investigar o efeito da sapata nos valores dos parâmetros de rugosidade avaliados considerando diferentes valores de raio de ponta do apalpador durante a medição com contato (2 μm , 5 μm e 10 μm).
- Avaliar o efeito da ponta do apalpador em amostras de Al, FF e AC obtidas pelo processo de retificação.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Set. 2002. 18p.
- ABNT - 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.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM ISSO 1 - **Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento.** 1997, 2p.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.** Edgard Blücher, 1977. 295p.
- ARANTES, L.J.; FERNANDES, K.A.; SCHRAMM, C.R.; LEAL, J.E.S.; PIRATELLIFILHO, A.; FRANCO, S.D.; ARENCIBIA, R.V. **The roughness characterization in cylinders obtained by conventional and flexible honing processes.** Artigo aprovado para publicação in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology em Abril 2017.
- ARFELD, E.D.; HANUM, A.L. **Aços de corte fácil de baixo carbono.** Metalurgia - ABM, v.33, n. 241, p. 773-776, dezembro de 1977.
- ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS **B46.1 - Surface texture (surface roughness, waviness, and lay).** 2002. 110p.
- BARBOSA, R. S. **Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio-silício (A356) quando mantido constante a produção de peças.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei, Brasil, 2014. 84p.

- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Chapter 2 Surface roughness analysis and measurement techniques (2000). Pp. 49-120.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 100 - **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement**, 2008.
- BONIFÁCIO, M.E.R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1983.
- CAIRE, E. **A história da origem da curva normal**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Brasil, 2013. 108 p.
- COHEN, P. H.; VOGT, R.C.; MARWANGA, R. O. Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons. In: AFS Casting Congress, Pittsburg. 2000.
- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D.C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. Technometric, v.35, n.1, p.1-12. 1993.
- 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**. 2011. Indian Journal of Pure & Applied Physics, V. 49 (May): 335–339.
- DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 3rd edition. England: Taylor Hobson Limited, 1998.
- DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Artes Médicas. 2006.
- DAVIM, J. P. **Surface integrity in machining**. New York: Springer. 2010.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística: para engenharia e ciências**. [Trad. SILVA, J.P.N.]. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
- DOBES, J. **Estudo da influência da vibração na medição da rugosidade**. 2014. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2014.
- DOBES, J.; LEAL, J. E.S.; PROFETA, J.; SOUZA, M.M., LÉPORE-NETO, F.P.; PIRATELLI-FILHO, A.; ARENCIBIA, R.V. **Effect of mechanical vibration on Ra, Rq, Rz and Rt roughness parameters**. Artigo submetido para publicação in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology em Fevereiro 2017.14p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1970, 751 pages.

- GEORGIOU, G. **CGI high speed machine tool solutions**. In: COMPACTE GRAPHITE IRON- MACHINING WORKSHOP, 5, 2002. Darmstadt.
- HAITJEMA, H. Uncertainty analysis of roughness standard calibration using stylus instruments. **Precision Engineering**, v.22, p 110-119, 1998.
- HAITJEMA, H.; MOREL, M. **The concept of a virtual roughness tester**. In: M. Dietzch and H. Trumpold (ed) Proceedings X. International Colloquium on Surfaces, 2000. P 239-244.
- HEITMANN, D.; PERMIEN, V. **Determination of surface roughness from light scattering measurements**. Optics Communications, Vol. 23, number 1, pp 131-134, 1977.
- 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.
- ISO TAG 4/WG 3, 2008. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, Geneva Switzerland, 141 p.
- LEACH, R. **The measurement of surface texture using stylus instruments**. Measurement Good Practice Guide No. 37 National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, (2001) 97 p.
- LEAL, J. E. S. **Avaliação da Incerteza em Processos Complexos de Medição Utilizando o Método de Monte Carlo**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- LYNCÉE TEC, **Roughness measurements with Digital Holographic Microscopy**. Disponível em <http://www.lynceetec.com/downloads/>. Novembro de 2015.
- MACHADO, A. **Avaliação da rugosidade em superfícies complexas**. Dissertação de Mestrado, Sociedade Educacional de Santa Catarina Instituto Superior Tupy, Joinville, Brasil, 2009. 106 p.
- MACHADO, A. R.; DA SILVA, M.B. **Usinagem dos metais**, apostila 8^a versão, EDUFU, Uberlândia, 2004. 257p.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T., ABRÃO, A.M.; DA SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2009. 384p.
- MARCHIORI, M.M. **Estudo de um sistema de medição a laser na análise da textura da superfície gerada por torneamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2013. 82 p.

- MARCO FILHO, Flávio de. **Apostila de metrologia.** Rio de Janeiro: UFRJ, Sub-Reitoria de Ensino de Graduação e Corpo Discente/SR-1, 1996. 106 p. – (Cadernos Didáticos UFRJ; 29).
- MILLS, B.; REDFORD, A.H. **Machinability of engineering Materials.** Applied Science Publications, 1983.
- MITUTOYO. **Guia rápido para instrumentos de medição de precisão.** 2016, L-17/18.
- MONTGOMERY, D.C. **Diseño e análisis de experimentos.** Trad. Por Jaime Delgado Saldivar. Mexico, Iberoamérica. 1991.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments,** Fourth ED., Wiley, New York. 2001.
- NETO, B. de B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos - Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria.** 2^a Ed. Campinas, Sp. Editora da Unicamp, 2003.
- NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica.** ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo. Brasil. 1994. 119p.
- 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. 135 p.
- PIRATELLI-FILHO, A.; DI GIACOMO, B. **Uncertainty evaluation in small angle calibration using ISO GUM approach and Monte Carlo Method.** XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd MILLenium. June 22-27, Dubrovnik, Croatia, 2003.
- PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade superficial. Palestra.** 3 Seminário de metrologia. 2011.
- POON, C.Y., BHUSHAN, B. **Comparison of Surface Roughness Measurements by Stylus Profiler, AFM and Non-Contact Optical Profiler.** 1995. Wear 190: 76–88.
- SMITH, G.T. **Advanced Machining - The handbook of cutting technology.** IFS Publications, 1989.
- SMITH, G. T. **Industrial metrology: Surfaces and Roundness.** London: Springer, 2002. 352p.
- SONG, J.; RENEGAR, T.B.; SOONS, J.; MURALIKRSHNAN, B.; VILLARRUBIA, J.; ZHENG, A.; VORBURGER, T.V. **The effect of tip size on the measured R_a of surface roughness specimens with rectangular profiles.** Published in Precision Engineering. 2014.
- SOUZA, A. J.; **Apostila de Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1.** Rio Grande do Sul, UFRGS, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. 2011. 89 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, p. 32-41, janeiro de 1993.
- VORBURGER, T.V., RHEE, H.G., RENEGAR, T.B., SONG, J.F., ZHENG, A. **Comparison of Optical and Stylus Methods for Measurement of Surface Texture**. International Journal Advances Manufacturing Technology 33: 100. 2007.
- WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface Metrology**, Leicester - England. 1994.

APÊNDICE I - VALORES MÉDIOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO COM CONTATO POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE PONTAS COM RAIOS DISTINTOS

Os valores médios dos parâmetros de rugosidade avaliados (R_a , R_q , R_p , R_v , R_z , R_t , R_{sk} e R_{ku}) obtidos na medição com contato utilizando pontas com raios distintos e iguais a 2 μm e 5 μm , no torneamento e fresamento, para as amostras de alumínio comercial (Al), ferro fundido cinzento (FF) e aço carbono 1020 (AC), são mostrados a seguir.

As barras em cor cinza e branca mostram os valores resultantes da medição com contato com ponta de 2 μm e com ponta de 5 μm , respectivamente. São mostrados também os valores de incerteza expandida (95%) associados à medição como sendo a barra de erros.

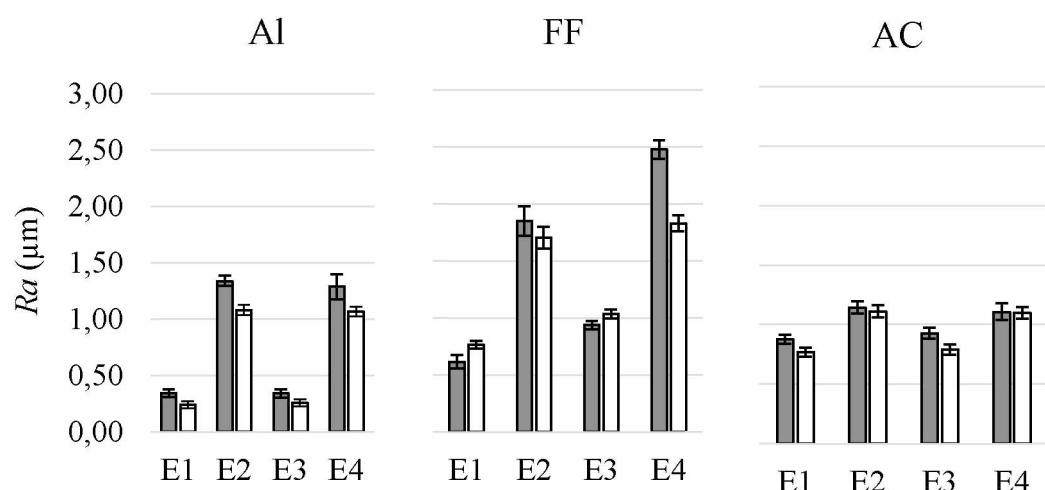
O experimento E1 refere-se à condição $ap = 0,5 \text{ mm}$ e $f = 0,1 \text{ mm/rot}$; E2 à $ap = 0,5 \text{ mm}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$; E3 à $ap = 1,0 \text{ mm}$ e $f = 0,1 \text{ mm/rot}$; e E4 à $ap = 1,0 \text{ mm}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$.

Ainda, são apresentados os quadros de ANOVA completos para os parâmetros, em que cinco fatores foram considerados: material (M), processo de usinagem (PR), raio de ponta (RP), profundidade de corte (ap) e avanço (f). O material foi avaliado em três níveis (Al, FF e AC) e os demais fatores em dois níveis (processo de usinagem - torneamento de faceamento e fresamento frontal; raio de ponta - igual a 2 μm e igual a 5 μm ; ap - igual a 0,5 mm e igual a 1,0 mm; f - igual a 0,1 mm/rot e igual a 0,2 mm/rot).

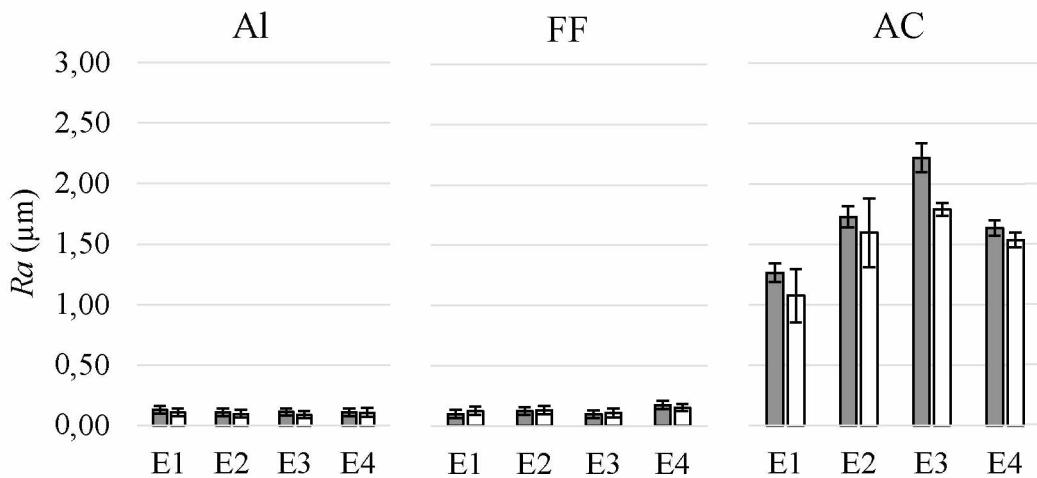
DESVIO ARITMÉTICO MÉDIO DO PERFIL (R_a)

Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm



Fresamento:

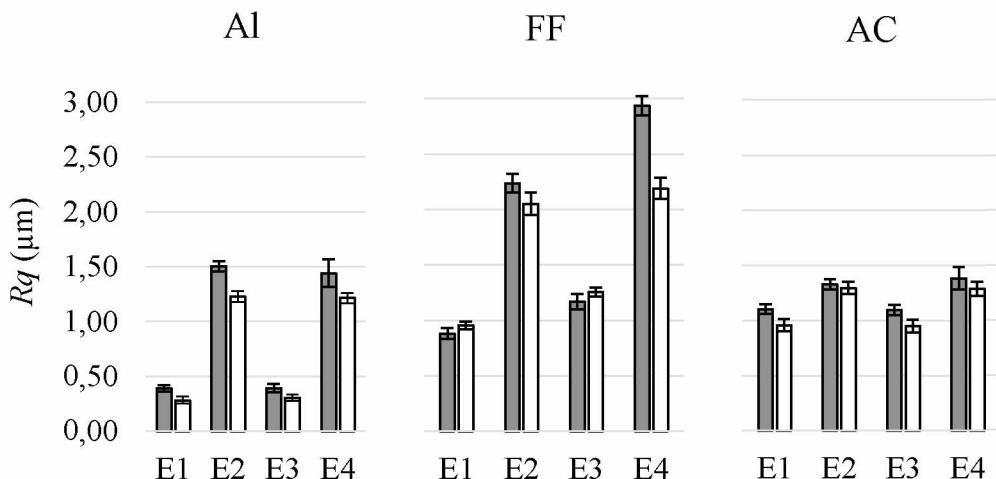


	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	19,94439	1	19,94439	80,43554	0,000000
<i>PR</i>	5,27476	1	5,27476	21,27307	0,000009
<i>RP</i>	0,26172	1	0,26172	1,05550	0,306055
<i>ap</i>	0,47698	1	0,47698	1,92364	0,167708
<i>f</i>	4,19860	1	4,19860	16,93292	0,000067
<i>Erro</i>	33,96982	138	0,24795		

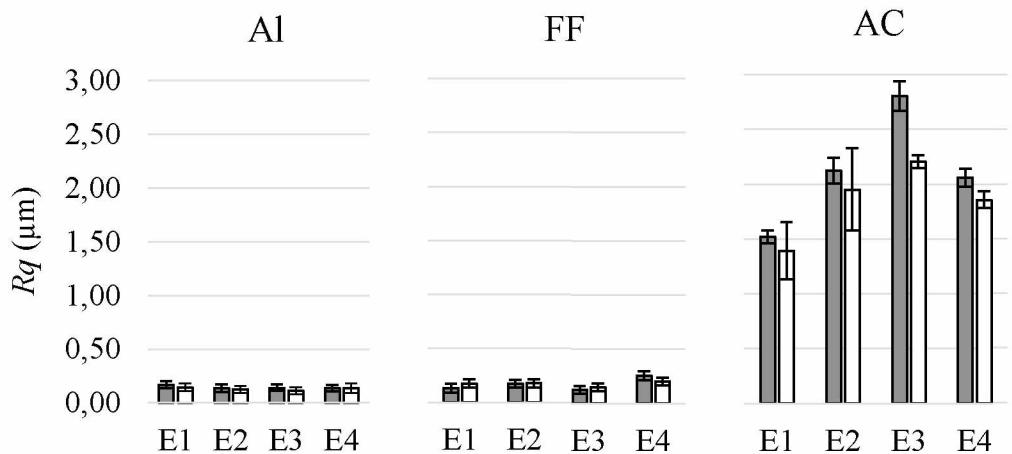
DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (*Rq*)

Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm



Fresamento:

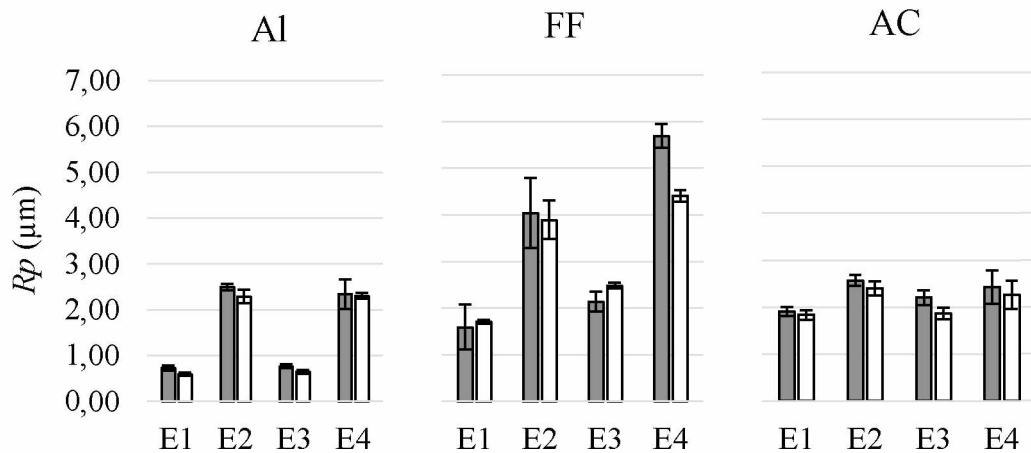


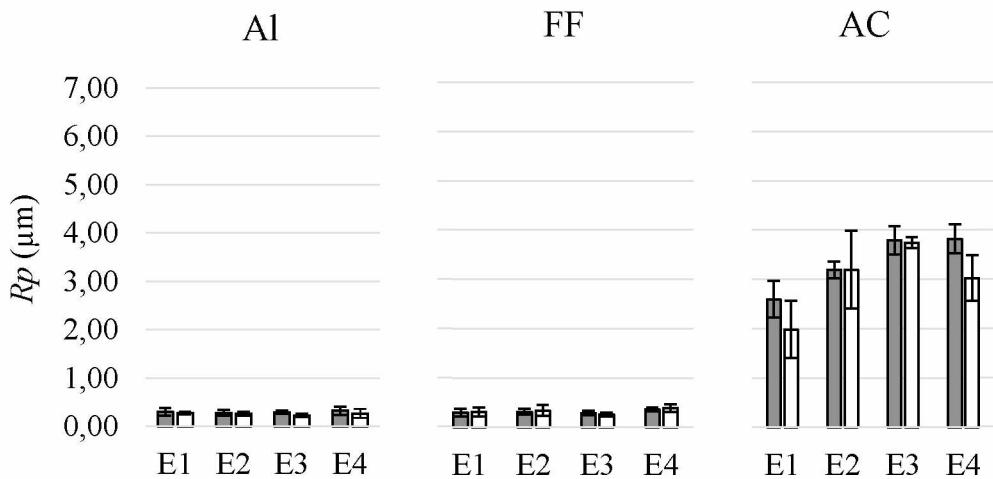
	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	0,88945	1	0,88945	9,1795	0,002926
PR	39,76175	1	39,76175	410,3571	0,000000
RP	0,07114	1	0,07114	0,7342	0,393034
ap	0,04972	1	0,04972	0,5132	0,474992
f	6,08916	1	6,08916	62,8426	0,000000
Erro	13,27468	138	0,09690		

ALTURA MÁXIMA DO PICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_p)

Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm

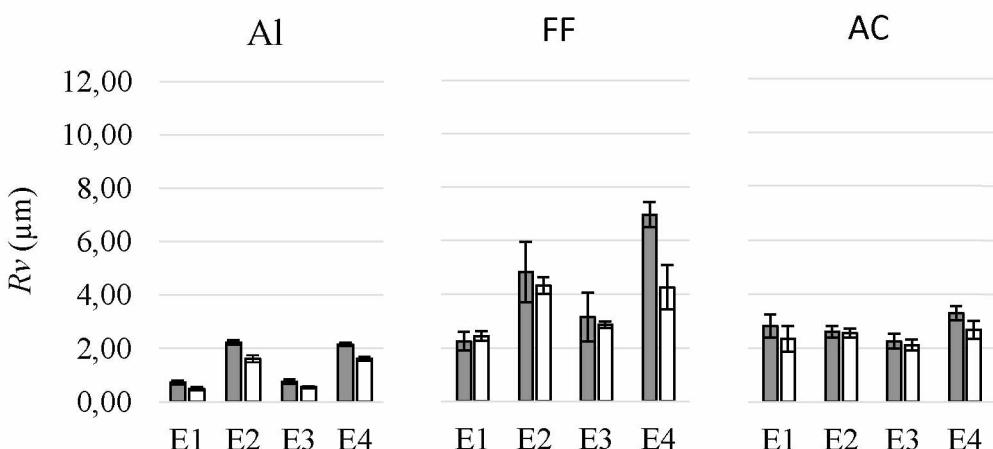


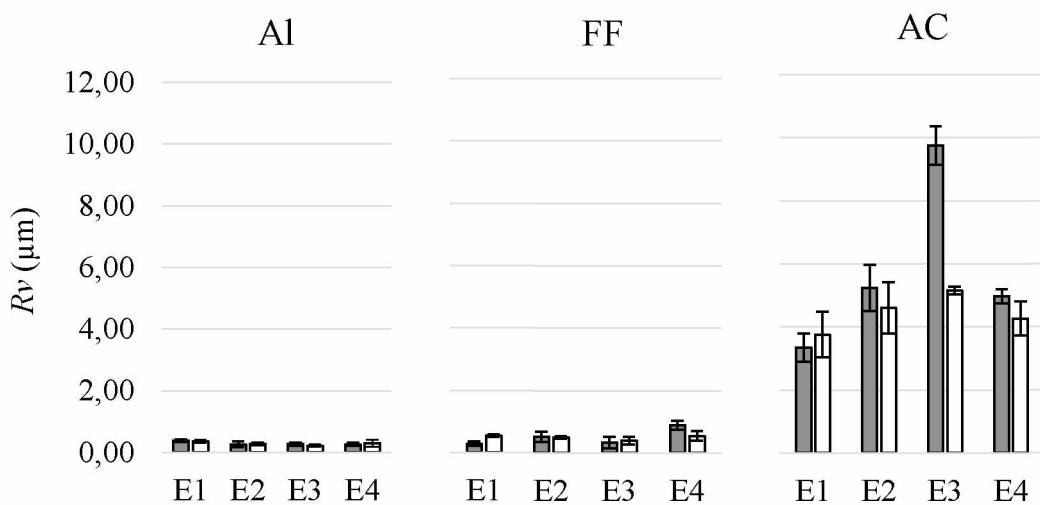
Fresamento:

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	83,4979	1	83,49792	70,20382	0,000000
<i>PR</i>	36,1512	1	36,15116	30,39536	0,000000
<i>RP</i>	1,6764	1	1,67638	1,40947	0,237198
<i>ap</i>	3,8095	1	3,80946	3,20294	0,075715
<i>f</i>	17,6460	1	17,64602	14,83651	0,000179
<i>Erro</i>	162,9429	138	1,18936		

PROFUNDIDADE MÁXIMA DO VALE DO PERFIL DE RUGOSIDADE (*Rv*)Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm

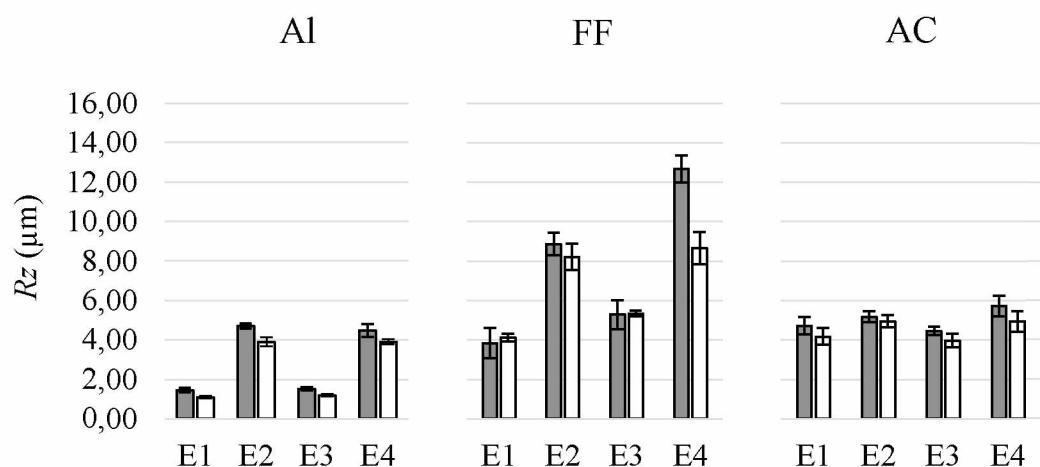


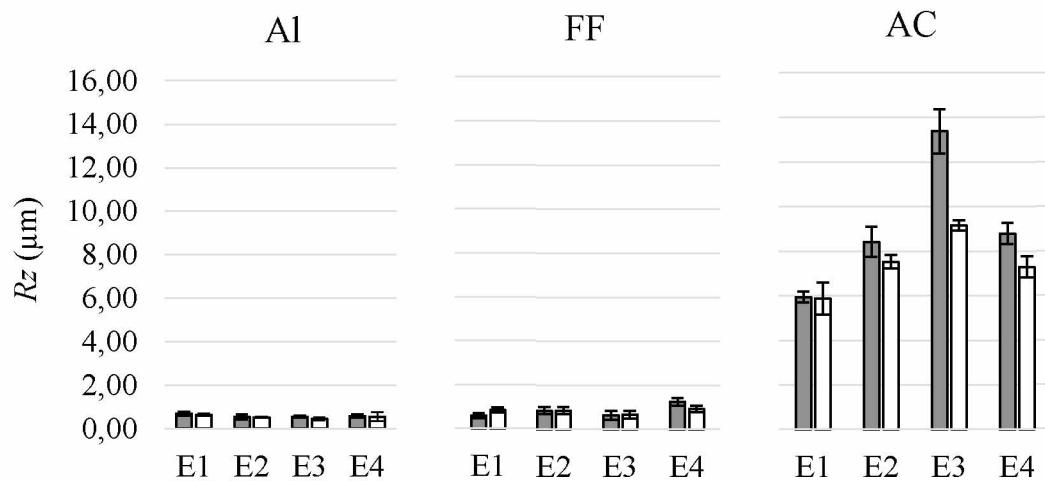
Fresamento:

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	232,0458	1	232,0458	105,5894	0,000000
<i>PR</i>	6,2476	1	6,2476	2,8429	0,094056
<i>RP</i>	4,6835	1	4,6835	2,1312	0,146618
<i>ap</i>	3,4499	1	3,4499	1,5698	0,212367
<i>f</i>	7,2093	1	7,2093	3,2805	0,072298
<i>Erro</i>	301,0745	138	2,1976		

ALTURA MÁXIMA DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rz)Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm

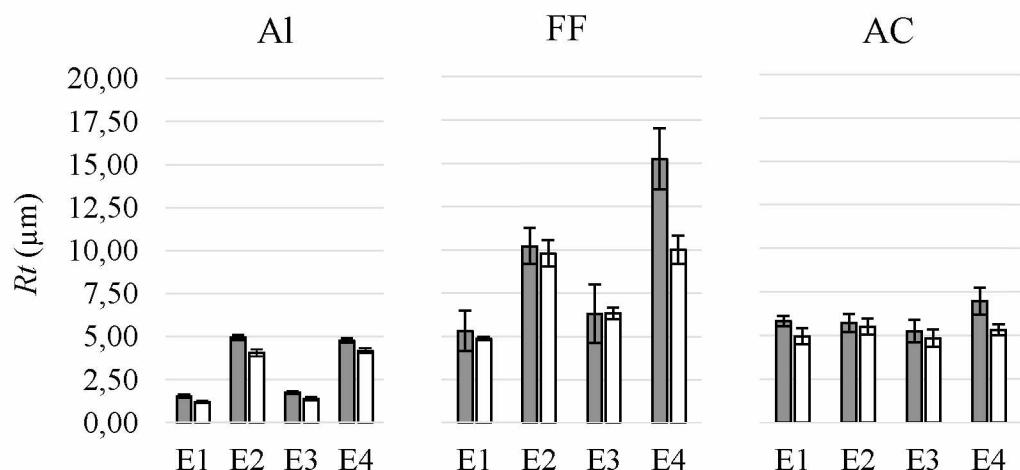


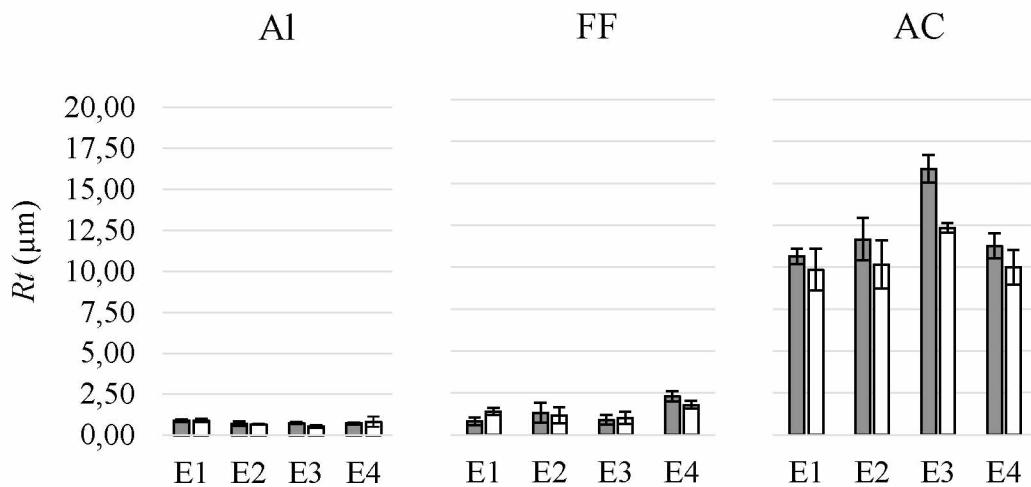
Fresamento:

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	600,107	1	600,1070	92,86333	0,000000
<i>PR</i>	70,673	1	70,6729	10,93625	0,001204
<i>RP</i>	12,244	1	12,2436	1,89463	0,170926
<i>ap</i>	14,685	1	14,6849	2,27240	0,133998
<i>f</i>	46,066	1	46,0663	7,12851	0,008504
<i>Erro</i>	885,330	138	6,4623		

ALTURA TOTAL DO PERFIL DE RUGOSIDADE (*Rt*)Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm

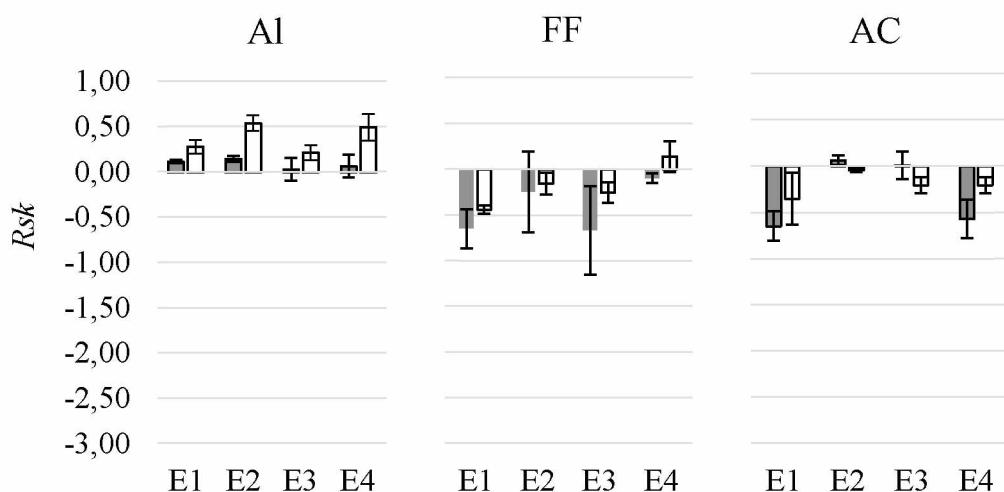


Fresamento:

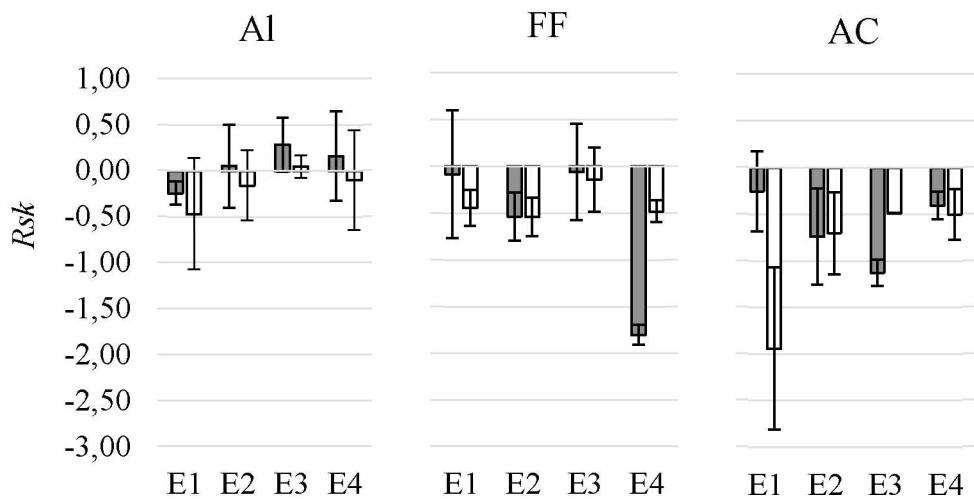
	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	1061,686	1	1061,686	108,2063	0,000000
PR	30,529	1	30,529	3,1115	0,079972
RP	15,578	1	15,578	1,5877	0,209791
ap	13,690	1	13,690	1,3953	0,239556
f	46,913	1	46,913	4,7813	0,030468
Erro	1344,201	138	9,812		

FATOR DE ASSIMETRIA DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rsk)Torneamento:

■ Ponta 2 µm □ Ponta 5 µm



Fresamento:

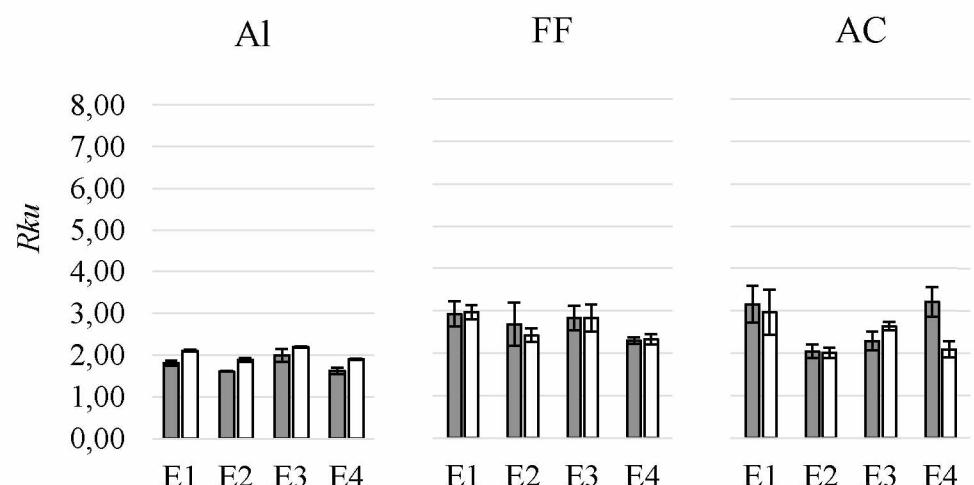


	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	9,17112	1	9,171121	44,90297	0,000000
<i>PR</i>	8,13343	1	8,133429	39,82230	0,000000
<i>RP</i>	0,00707	1	0,007070	0,03462	0,852679
<i>ap</i>	0,25192	1	0,251920	1,23343	0,268686
<i>f</i>	0,15152	1	0,151516	0,74184	0,390577
<i>Erro</i>	27,98130	138	0,204243		

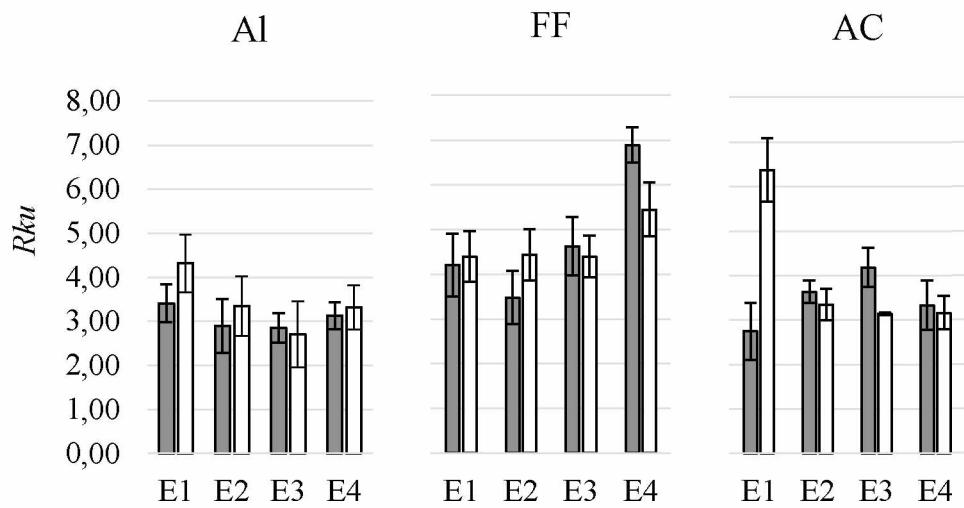
FATOR DE ACHATAMENTO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_{ku})

Torneamento:

■ Ponta 2 μm □ Ponta 5 μm



Fresamento:



	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
<i>M</i>	3,9809	1	3,9809	2,57596	0,110801
<i>PR</i>	108,4497	1	108,4497	70,17605	0,000000
<i>RP</i>	0,2363	1	0,2363	0,15289	0,696395
<i>ap</i>	0,0009	1	0,0009	0,00060	0,980515
<i>f</i>	0,7716	1	0,7716	0,49930	0,481008
<i>Erro</i>	211,7190	138	1,5454		

APÊNDICE II - QUADRO ANOVA COMPLETO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

O quadro de ANOVA completo considerando cinco fatores como variáveis independentes para a obtenção dos parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv , Rz , Rt , Rsk e Rku são apresentados a seguir. Esses fatores são: material (M), processo de usinagem (PR), tipo de medição (TM), profundidade de corte (ap) e avanço (f), sendo o material avaliado em três níveis (alumínio comercial, ferro fundido cinzento e aço carbono 1020) e os demais em dois níveis (processo de usinagem - torneamento de faceamento e fresamento frontal; tipo de medição - com contato e sem contato; ap - igual a 0,5 mm e igual a 1,0 mm; f - igual a 0,1 mm/rot e igual a 0,2 mm/rot).

DESVIO ARITMÉTICO MÉDIO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Ra)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	24,99725	1	24,99725	86,19781	0,000000
PR	6,38677	1	6,38677	22,02346	0,000006
TM	2,77496	1	2,77496	9,56887	0,002399
ap	0,69682	1	0,69682	2,40283	0,123423
f	4,37311	1	4,37311	15,07976	0,000160
<i>Erro</i>	39,72982	138	0,29000		

DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rq)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	37,7387	1	37,73870	94,70962	0,000000
PR	8,3290	1	8,32901	20,90262	0,000011
TM	5,1468	1	5,14681	12,91652	0,000453
ap	0,8512	1	0,85120	2,13620	0,146148
f	5,6725	1	5,67255	14,23592	0,000239
<i>Erro</i>	54,5900	138	0,39847		

ALTURA MÁXIMA DO PICO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_p)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	116,7077	1	116,7077	82,30474	0,000000
PR	75,9210	1	75,9210	53,54110	0,000000
TM	120,1135	1	120,1135	84,70663	0,000000
ap	5,0032	1	5,0032	3,52840	0,062451
f	20,7500	1	20,7500	14,63334	0,000198
$Erro$	194,2652	138	1,4180		

PROFUNDIDADE MÁXIMA DO VALE DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_v)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	393,106	1	393,1062	109,1824	0,000000
PR	4,224	1	4,2245	1,1733	0,280622
TM	140,953	1	140,9533	39,1488	0,000000
ap	9,496	1	9,4965	2,6376	0,106662
f	7,721	1	7,7206	2,1444	0,145386
$Erro$	493,262	138	3,6005		

ALTURA MÁXIMA DO PERFIL DE RUGOSIDADE (R_z)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	785,323	1	785,3235	83,43057	0,000000
PR	145,811	1	145,8114	15,49059	0,000131
TM	415,299	1	415,2993	44,12024	0,000000
ap	17,793	1	17,7930	1,89028	0,171415
f	31,616	1	31,6162	3,35882	0,069017
$Erro$	1289,567	138	9,4129		

ALTURA TOTAL DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rt)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	1433,401	1	1433,401	116,0103	0,000000
PR	79,686	1	79,686	6,4493	0,012216
TM	791,774	1	791,774	64,0811	0,000000
ap	21,572	1	21,572	1,7459	0,188591
f	85,368	1	85,368	6,9091	0,009555
$Erro$	1692,746	138	12,356		

FATOR DE ASSIMETRIA DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rsk)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	6,99538	1	6,995376	39,84191	0,000000
PR	7,74852	1	7,748522	44,13142	0,000000
TM	0,01413	1	0,014133	0,08050	0,777056
ap	0,38537	1	0,385372	2,19487	0,140767
f	0,02693	1	0,026934	0,15340	0,695913
$Erro$	24,05423	138	0,175578		

FATOR DE ACHATAMENTO DO PERFIL DE RUGOSIDADE (Rku)

	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
M	0,0008	1	0,0008	0,00045	0,098317
PR	100,7531	1	100,7531	53,14381	0,000000
TM	51,8772	1	51,8772	27,36346	0,000001
ap	1,3582	1	1,3582	0,71640	0,398803
f	1,7807	1	1,7807	0,93924	0,334181
$Erro$	259,7324	138	1,8959		

ANEXO I - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

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

1. Cliente

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

2. Instrumento de medição

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

3. Calibração

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

4. Procedimento

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



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

ANEXO I (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

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

Condições de Medição:

Ra (0,38 µm)

Cut-off (lr) = 0,08 mm

Comprimento de avaliação (ln) = 0,4 mm

5. Condições ambientais

Temperatura: (20 \pm 1) °C

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade

Fabricante: Mitutoyo

Código: 178-604

Número de série: 001031008

Valor nominal: Ra (0,38 µm)

Número do Certificado de Calibração: 15218/11

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

Tipo: Termo-higrômetro Digital

Fabricante: Instrutherm

Modelo: HT-260

Número de série: 06120362

Número do Certificado de Calibração: R4996/13

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

Tipo: Desempeno de Granito

Fabricante: Mitutoyo

Capacidade: 1000 x 1000 mm

Número do Certificado de Calibração: 06994/13

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

7. Resultados da calibração

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

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

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

ANEXO I (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RUGOSÍMETRO

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

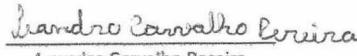
8. Incerteza da calibração

Ra (0,38 µm)		
Posição 1	U (µm)	k
	0,02	2,23

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

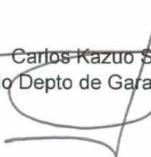
Data da Emissão: Uberlândia, (17) de (março) de (2016).


Rosenda Valdes Arencibia
 Gerente Responsável

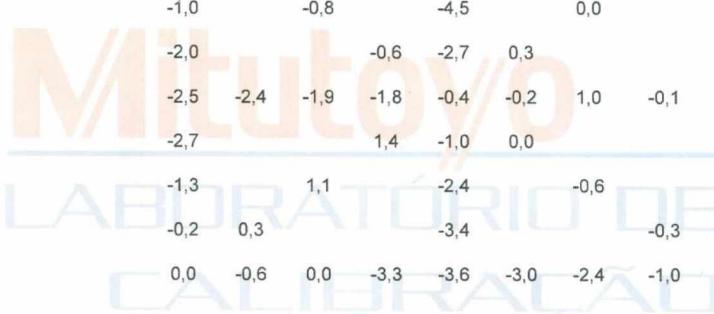

Leandro Carvalho Pereira
 Operador

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

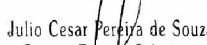
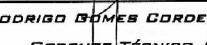
ANEXO II - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO DESEMPENO DE GRANITO

 <p>LABORATÓRIO DE METROLOGIA Mitutoyo Sul Americana</p> <p>Data da Calibração: 28.05.2013</p> <p>Nº Certificado: 06994/13</p> <p>Nº do Instrumento / Padrão: 05906</p> <p>Data da próxima calibração:</p> <p>Preenchido pelo Cliente</p> <p>CAL 0031</p>	 <p>Calibração NBR ISO/IEC 17025</p> <p>a</p> <p>z</p> <p>CAL 0031</p>	<p style="text-align: center;">LABORATÓRIO DE METROLOGIA</p> <p style="text-align: center;">REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Certificado de Calibração No. : 06994/13</p> <p>Cliente : " FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA. "</p> <p>Endereço : Av. Amazonas, 2210, Campus Umuarama, Uberlandia, MG - Cep-38400-902</p> <p>Ordem de Serviço No. : 035.766/002</p> <p>1 - INSTRUMENTO CALIBRADO</p> <p>Desempenho de Granito</p> <p>Fabricante : Mitutoyo</p> <p>Código : Sem identificação</p> <p>No. de Série : Sem identificação</p> <p>Capacidade : 1000 x 1000 mm</p> <p>Id. do Proprietário : 059606</p> <p>2 - PADRÃO DE REFERÊNCIA</p> <p>Nível diferencial</p> <p>Modelo / Código : N/C</p> <p>No. de Série : 7319</p> <p>Certificado No. : 15363/12- RBC - Mitutoyo</p> <p>Validade : 12/2013</p> <p>3 - PROCEDIMENTO DE MEDIDAÇÃO : PML - 0044 Versão 1/2.</p> <p>O desvio de planeza do desempenho foi determinado através da medição angular com a utilização de um Nível. O método consiste em obter com a ajuda do nível, as alturas dos pontos de referência definida no mapeamento.</p> <p>Data de calibração : 28 de Maio de 2013</p> <p>Data de emissão : 04 de Julho de 2013</p> <p style="text-align: right; margin-right: 50px;">  Carlos Kazuo Suetake Gerente do Depto de Garantia da Qualidade </p> <p style="text-align: center;">pág.: 1 / 2</p> <p><small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avalia a competência do laboratório e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI). A reprodução deste Certificado só poderá ser total e dependerá da aprovação por escrito da Mitutoyo.</small></p> <p><small>Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.</small></p> <p><small>*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 *Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5958 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br</small></p>
--	---	---

**ANEXO II (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
DESEMPENO DE GRANITO**

 <i>Mitutoyo Sul Americana Ltda.</i>																																																																																																			
Certificado de Calibração No. : 06994/13																																																																																																			
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO																																																																																																			
Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031																																																																																																			
4- RESULTADO DA MEDIDA : Mapeamento em (mm)																																																																																																			
																																																																																																			
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0,8</td><td>0,4</td><td>-0,8</td><td>-2,4</td><td>-2,2</td><td>-2,3</td><td>-1,5</td><td>-0,8</td><td>0,0</td><td></td></tr> <tr><td>-0,1</td><td>0,8</td><td></td><td></td><td>-3,4</td><td></td><td></td><td>0,8</td><td>0,1</td><td></td></tr> <tr><td>-1,0</td><td></td><td>-0,8</td><td></td><td>-4,5</td><td></td><td>0,0</td><td></td><td>0,1</td><td></td></tr> <tr><td>-2,0</td><td></td><td></td><td>-0,6</td><td>-2,7</td><td>0,3</td><td></td><td></td><td>-0,4</td><td></td></tr> <tr><td>-2,5</td><td>-2,4</td><td>-1,9</td><td>-1,8</td><td>-0,4</td><td>-0,2</td><td>1,0</td><td>-0,1</td><td>-1,0</td><td></td></tr> <tr><td>-2,7</td><td></td><td></td><td>1,4</td><td>-1,0</td><td>0,0</td><td></td><td></td><td>-0,7</td><td></td></tr> <tr><td>-1,3</td><td></td><td>1,1</td><td></td><td>-2,4</td><td></td><td>-0,6</td><td></td><td>-0,5</td><td></td></tr> <tr><td>-0,2</td><td>0,3</td><td></td><td></td><td>-3,4</td><td></td><td></td><td>-0,3</td><td>0,2</td><td></td></tr> <tr><td>0,0</td><td>-0,6</td><td>0,0</td><td>-3,3</td><td>-3,6</td><td>-3,0</td><td>-2,4</td><td>-1,0</td><td>0,8</td><td></td></tr> </table>										0,8	0,4	-0,8	-2,4	-2,2	-2,3	-1,5	-0,8	0,0		-0,1	0,8			-3,4			0,8	0,1		-1,0		-0,8		-4,5		0,0		0,1		-2,0			-0,6	-2,7	0,3			-0,4		-2,5	-2,4	-1,9	-1,8	-0,4	-0,2	1,0	-0,1	-1,0		-2,7			1,4	-1,0	0,0			-0,7		-1,3		1,1		-2,4		-0,6		-0,5		-0,2	0,3			-3,4			-0,3	0,2		0,0	-0,6	0,0	-3,3	-3,6	-3,0	-2,4	-1,0	0,8	
0,8	0,4	-0,8	-2,4	-2,2	-2,3	-1,5	-0,8	0,0																																																																																											
-0,1	0,8			-3,4			0,8	0,1																																																																																											
-1,0		-0,8		-4,5		0,0		0,1																																																																																											
-2,0			-0,6	-2,7	0,3			-0,4																																																																																											
-2,5	-2,4	-1,9	-1,8	-0,4	-0,2	1,0	-0,1	-1,0																																																																																											
-2,7			1,4	-1,0	0,0			-0,7																																																																																											
-1,3		1,1		-2,4		-0,6		-0,5																																																																																											
-0,2	0,3			-3,4			-0,3	0,2																																																																																											
0,0	-0,6	0,0	-3,3	-3,6	-3,0	-2,4	-1,0	0,8																																																																																											
Erro de Planeza : 5,8 μm Lado : dois apoios																																																																																																			
5 - INCERTEZA DE MEDIDA : U = 2,9 μm																																																																																																			
A incerteza expandida de medida relatada é declarada como a incerteza padrão da medida multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,25$, para o qual uma distribuição t com $V_{eff} = 11$ graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.																																																																																																			
A incerteza padrão da medida foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.																																																																																																			
6- Nota : Temperatura ambiente : (20,4 \pm 0,5) °C																																																																																																			
<p style="font-size: small;">pág.: 2 / 2</p> <hr/> <p style="font-size: small; margin: 0;"> Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br </p>																																																																																																			

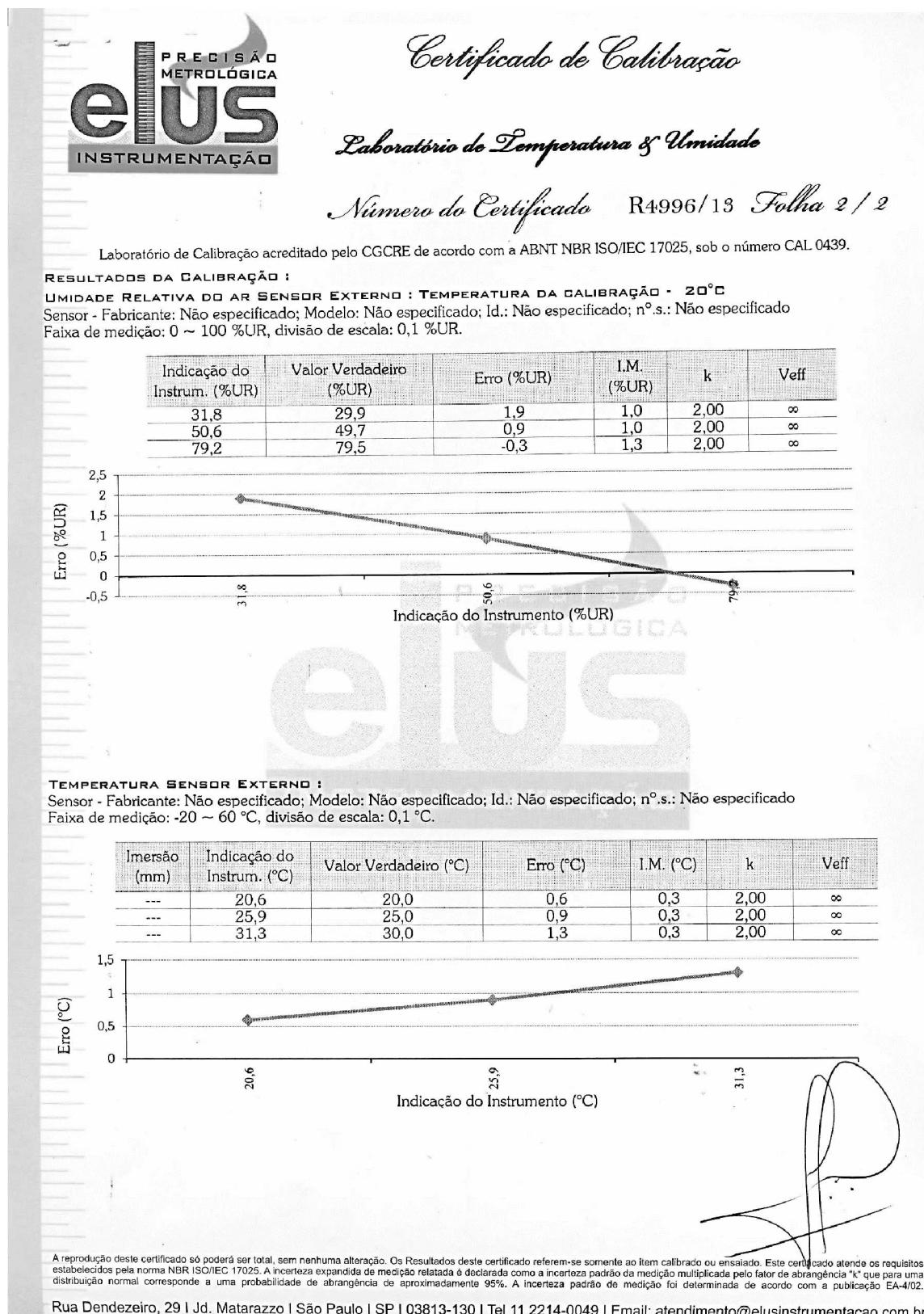
**ANEXO III - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMO-HIGRÔMETRO
DIGITAL**

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

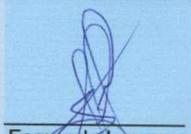
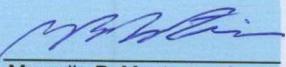
A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza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

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

ANEXO III (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMO-HIGRÔMETRO DIGITAL



ANEXO IV - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INTERFERÔMETRO

	<p style="text-align: center;">LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO</p> <p style="text-align: center;">CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº : 030/16</p> <p style="text-align: center;">CARACTERÍSTICAS DO OBJETO</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Cliente:</td> <td style="width: 40%;">Universidade Federal de Uberlândia</td> <td style="width: 30%;">Capacidade :</td> <td style="width: 30%;">200 mm</td> </tr> <tr> <td>Objeto :</td> <td>Medidor de Superfície</td> <td>Menor Divisão :</td> <td>0,01 µm</td> </tr> <tr> <td>Fabricante :</td> <td>Taylor Hobson Limited</td> <td>Ano de Fabricação :</td> <td>NC</td> </tr> <tr> <td>Modelo :</td> <td>CLI 2000</td> <td>OS :</td> <td>3720</td> </tr> <tr> <td>Número de Controle :</td> <td>310.195</td> <td>Número de Série :</td> <td>2144DS</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">PROCEDIMENTOS E/OU NORMAS APLICADAS</p> <p>Procedimento de Calibração : Calibração efetuada baseada no manual de serviço do equipamento.</p> <p style="text-align: center;">CONDIÇÕES DO ENSAIO</p> <p>Temperatura : 20,0 +/- 1° C</p> <p style="text-align: center;">PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S) NA CALIBRAÇÃO</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Nº Série</th> <th style="width: 25%;">Descrição</th> <th style="width: 15%;">Identificação</th> <th style="width: 25%;">Próxima Calibração</th> <th style="width: 20%;">Nº Certificado / Emissor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>112/1534</td> <td>Padrão de Rugosidade</td> <td>15</td> <td>26.05.17</td> <td>25707.1 / SOCIESC - RBC</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">OBSERVAÇÕES GERAIS</p> <p>Notas:</p> <p>1- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores de k são apresentados na tabela de resultados. 2- A reprodução deste certificado só poderá ser completa, para realização da reprodução parcial, somente com a aprovação por escrito do Laboratório de Calibração Taylor Hobson do Brasil. 3- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. 4- O objeto referenciado no certificado encontra-se funcional e em condição de ser calibrado, mas não o isenta do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.</p> <p>Data da Calibração : 07.07.16 Local da Calibração : Laboratório Universidade Federal de Uberlândia Endereço do Cliente : Av. João Naves de Avila, 2121. Bloco 1M, Campus Santa Monica. Data da Última Calibração: NC</p> <p style="text-align: center;">  Fernando Lopez Técnico Calibrador </p> <p style="text-align: right;">  Marcello B. Montagnani Responsável Técnico Data da Emissão: 29.07.16 </p> <p style="text-align: center;">CÓDIGO DO FORMULÁRIO:01.1281.009.001</p> <p style="text-align: center; font-size: small;"> Taylor Hobson do Brasil Ltda. Rua Gaspar Lourenço, 605 - Vila Mariana - 04107-001 - São Paulo - SP Tel.(0XX11)5083-3846 - Fax.(0XX11)5083-3846 www.taylorhobson.com.br 1 de 3 </p>	Cliente:	Universidade Federal de Uberlândia	Capacidade :	200 mm	Objeto :	Medidor de Superfície	Menor Divisão :	0,01 µm	Fabricante :	Taylor Hobson Limited	Ano de Fabricação :	NC	Modelo :	CLI 2000	OS :	3720	Número de Controle :	310.195	Número de Série :	2144DS	Nº Série	Descrição	Identificação	Próxima Calibração	Nº Certificado / Emissor	112/1534	Padrão de Rugosidade	15	26.05.17	25707.1 / SOCIESC - RBC
Cliente:	Universidade Federal de Uberlândia	Capacidade :	200 mm																												
Objeto :	Medidor de Superfície	Menor Divisão :	0,01 µm																												
Fabricante :	Taylor Hobson Limited	Ano de Fabricação :	NC																												
Modelo :	CLI 2000	OS :	3720																												
Número de Controle :	310.195	Número de Série :	2144DS																												
Nº Série	Descrição	Identificação	Próxima Calibração	Nº Certificado / Emissor																											
112/1534	Padrão de Rugosidade	15	26.05.17	25707.1 / SOCIESC - RBC																											

**ANEXO IV (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
INTERFERÔMETRO**



Certificado de Calibração
Nº : 030/16

1 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) antes dos ajustes (medidor com contato indutivo)

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
2,50	5,99	5,78	-0,21	0,30	2,00	0,30
0,50	5,99	5,77	-0,22	0,30	2,00	0,30
0,10	5,99	5,67	-0,32	0,30	2,00	0,30

2 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) após os ajustes (medidor com contato indutivo) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
2,50	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30
0,50	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30
0,10	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

3 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) antes dos ajustes (medidor laser sem contato) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
10,00	5,99	5,94	-0,05	0,30	2,00	0,30

4 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) após os ajustes (medidor laser sem contato) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
10,00	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

OBSERVAÇÕES:

Gauge Indutivo - faixa de trabalho alta - 2,50 mm
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho média - 0,5 mm
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho baixa - 0,1 mm
 Laser - faixa de trabalho - 10,0 mm
 CLA - faixa de trabalho - 0,3 mm

Fernando Lopez
Técnico Calibrador

Marcello B. Montagnani
Responsável Técnico

**ANEXO IV (CONTINUAÇÃO) - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
INTERFERÔMETRO**



Certificado de Calibração
Nº : 030/16

5 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) antes dos ajustes (medidor CLA) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
0,3	5,99	5,94	-0,05	0,30	2,00	0,30

6 - Resultados da Calibração de Rugosidade (Ra) após os ajustes (medidor CLA) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
0,3	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

7 - Resultados da Validação de Erro da Superfície :

Área (mm)	Valores (µm)	Tolerância +/- (µm)
195 X 195	0,0912	2
180 x 180	0,0889	2
150 x 150	0,0634	2
100 x 100	0,0475	2
50 x 50	0,0255	2

OBSERVAÇÕES:

- Gauge Indutivo - faixa de trabalho alta - 2,50 mm
- Gauge Indutivo - faixa de trabalho média - 0,5 mm
- Gauge Indutivo - faixa de trabalho baixa - 0,1 mm
- Laser - faixa de trabalho - 10,0 mm
- CLA - faixa de trabalho - 0,3 mm

Fernando Lopez
Técnico Calibrador

Marcello B. Montagnani
Responsável Técnico