

JEFFERSON DOBES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA
MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

JEFFERSON DOBES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA MEDIÇÃO DA
RUGOSIDADE**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Morais de Sousa

UBERLÂNDIA – MG

2014

AGRADECIMENTOS

Esta Dissertação de Mestrado só aconteceu graças à ajuda e apoio de várias pessoas e instituições, às quais serei eternamente grato, entre as quais destaco:

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica, ao curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica e aos Laboratórios de Sistema Mecânico-LSM, de Atrito e Desgaste – LTAD e o de Metrologia Dimensional – LMD pela liberação e oportunidade de realizar o curso de pós-graduação e os experimentos necessários.

Ao aluno de graduação José Eduardo Silveira Leal no total apoio na montagem dos experimentos, nas medições e coletas de dados, além da valiosa ajuda na confecção desta dissertação.

Ao Prof. Dr Marcos Moraes de Sousa, meu co-orientador, nas certas e providenciais correções de rumo nos assuntos relativos à matéria vibração.

Ao Prof. Dr Francisco Paulo Léporo Neto e ao Técnico Jonas Profeta do LSM na montagem e condução dos experimentos.

Ao Prof. M.Sc. Rafael Ariza Gonçalves e à aluna de graduação Daniela Souza Carvalho Garcia pela ajuda prestada na obtenção das micrografias.

Ao aluno de doutorado Luciano da Rocha Magalhães e ao Técnico Flávio Alves da Silva, ambos do LTAD pelo apoio na realização dos experimentos no interferômetro e no microscópio eletrônico de varredura – MEV, respectivamente.

Aos engenheiros Luiz Antônio dos Santos e Gualter Aurélio Alves de Souza, ao Técnico Baltazar Correia da Silva pelo apoio brindado durante a realização deste trabalho.

Propositamente deixei por último este agradecimento pra gastar tudo nele. Poderia falar da profissional competente que me educa, ou da pessoa de fibra que me chama à vitória naqueles momentos que quis desistir, ou ainda da jovem mulher (sou bem mais velho) que conforme sua fala me adotou como filho (postura esta que assume com todos os seus alunos), mas não, quero falar simplesmente da minha orientadora Profa Dra Rosenda Valdés Arencibia, que permanecerá eternamente em meu coração.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a dez pessoas:

Meu querido pai (*in memoriam*), obrigado pelo seu exemplo de homem.

Minha mãe Amélia, mulher de verdade que sempre me dá carinho.

Meus quatro irmãos, amigos inseparáveis.

Meus três filhos Vinicius, Laura e Guta que me dão prazer em ser pai.

Minha Esposa Viviani, companheira pra toda vida, te amo.

DOBES, J. **Estudo da Influência da Vibração na Medição da Rugosidade**. 2014. 140f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG

Resumo

Este trabalho tem como objetivo identificar o efeito da vibração mecânica sobre os valores médios dos parâmetros de rugosidade e da incerteza associada à medição por meio de um rugosímetro eletromecânico modelo TR200 – HOMIS. Os ensaios foram realizados aplicando vibração na direção normal ao curso de deslocamento do apalpador, para diferentes valores de frequência e de amplitude. O sistema de geração de vibração consistiu de um excitador eletrodinâmico e a medição da aceleração foi realizada por meio de um acelerômetro piezelétrico. Para tanto, foram executadas as seguintes etapas: i) medição dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_t) de três amostras, em condições sem vibração por meio do rugosímetro eletromecânico. Para efeitos de comparação e análise a rugosidade, também, foi medida sem contato utilizando um interferômetro; ii) pré-testes, que consistiram na medição da rugosidade e da vibração de forma simultânea em uma amostra de alumínio considerando uma banda de frequência de 50 Hz a 150 Hz e quatro níveis de aceleração; iii) a partir dos resultados obtidos nos pré-testes, foi definido o planejamento fatorial 3^2 no qual foram medidos R_a , R_q , R_z e R_t em três amostras considerando como variáveis independentes a frequência e a aceleração, ambas em três níveis, a saber 60 Hz, 80 Hz e 100 Hz para a frequência, com a aceleração de $0,6 \text{ m/s}^2$, $1,0 \text{ m/s}^2$ e $1,6 \text{ m/s}^2$; iv) análise de variância para verificar se as diferenças observadas entre os valores médios de um dado parâmetro de rugosidade são significativas ou não e v) avaliação da incerteza de medição utilizando o método de Monte Carlo. O procedimento utilizado permitiu verificar que a vibração mecânica produz alterações nos valores médios dos parâmetros de rugosidade avaliados e que os maiores valores de incerteza-expandida foram encontrados para as frequências de 80 Hz e 100 Hz e aceleração de $1,0 \text{ m/s}^2$.

Palavras Chave: rugosidade, vibração, medição com e sem contato

DOBES, J. **Study of the Influence of Vibration on Roughness Measurement**. 2014. 140f.
Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG

Abstract

This study aimed to identify the effect of interference produced by mechanical vibration on the average values of roughness parameters and associated measurement uncertainty by means of an electromechanical model TR200 roughness - Homis. Tests were performed by applying vibration in the direction perpendicular to the probe travel path, for different values of frequency and amplitude. The generating system consisted of an electrodynamic vibration exciter and the acceleration measurement was performed by means of a piezoelectric accelerometer. The work was carried out according to the following steps: i) measurement of roughness parameters (R_a , R_q , R_z and R_t) of three samples in conditions without vibration. For comparison and analysis, the roughness was also measured, non-contact, using an interferometer; ii) pre - testing, which consisted of roughness measurement and vibration simultaneously on an aluminum sample considering a frequency band of 50 Hz to 150 Hz and four levels of acceleration; iii) 3^2 factorial design, which was defined from the results obtained in the pre-tests, which were measured R_a , R_q , R_z and R_t in three samples, independent variables were the frequency and acceleration, both on three levels, namely 60Hz, 80 Hz and 100 Hz for the frequency, with acceleration from 0,6 m/s², 1.0 m/s² and 1.6m/s². Analysis of variance, was used to verify if the differences between the mean values of roughness parameters evaluated are significant or not. Finally the measurement uncertainty was evaluated using the Monte Carlo method. The procedure has shown that the mechanical vibration produces changes in the mean values of roughness parameters evaluated and the highest values of expanded uncertainty were found for frequencies of 80 Hz and 100 Hz and acceleration of 1.0 m/s².

Keywords: roughness, vibration, contact and non-contact measurement

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição da superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002)	6
Figura 2.2 - Marcas deixadas pela ferramenta na superfície (TAYLOR HOBSON, 2003)	6
Figura 2.3 – Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)	7
Figura 2.4 – Avaliação visual e tátil da rugosidade utilizando padrões (TAYLOR HOBSON, 2003)	9
Figura 2.5 – Rugosímetro eletromecânico digital (TAYLOR HOBSON, 2003)	10
Figura 2.6 – Interferométrico com luz branca e laser (medição sem contato) e agulha de diamante (medição com contato) (ARENCIBIA <i>et al.</i> , 2010)	10
Figura 2.7 – Influência das dimensões da ponta da agulha na obtenção do perfil de rugosidade (TAYLOR HOBSON, 2003).....	11
Figura 2.8 – Efeito da direção de apalpação no perfil efetivo da rugosidade (LEACH, 2001)	12
Figura 2.9 – Desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a) (PIRATELLI, 2011).....	13
Figura 2.10 - Representação do R_a para perfis diferentes (TAYLOR HOBSON, 2003) ...	13
Figura 2.11 - Altura máxima do perfil (ABNT NBR 4287, 2002)	14
Figura 2.12 - Perfis de rugosidade com o mesmo valor de R_z (LEACH, 2001)	14
Figura 2.13 - Curva da razão portante do perfil (ABNT NBR 4287, 2002)	15
Figura 2.14 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994)	18
Figura 2.15 - Frequências fundamentais e harmônicas (FERNANDES, 2002)	19
Figura 2.16 - Espectro de frequência (SANTOS, 2011)	20
Figura 2.17 - Acelerômetro piezelétrico (FERNANDES, 2000)	22
Figura 2.18 - Distribuição normal (ISO TAG 4WG 3, 2008)	26
Figura 2.19 - Distribuição retangular (ISO TAG 4WG 3, 2008)	27
Figura 2.20 - Distribuição trapezoidal (ISO TAG 4WG 3, 2008)	28
Figura 2.21 - Distribuição triangular (ISO TAG 4WG 3, 2008)	28

Figura 3.1 – (a) amostras avaliadas, 1: de alumínio, 2: amostra de aço inox, 3: de aço carbono, (b) Rugosímetro, modelo TR200 da Homis	43
Figura 3.2 – Tela principal do programa TimeSurf For TR200 V1.4	44
Figura 3.3 – Tela inicial do programa TimeSurf For TR200 V1.4	45
Figura 3.4 - Rugosímetro e excitador posicionados sobre a mesa inercial	46
Figura 3.5 – Posicionamento do rugosímetro no dispositivo de acrílico sobre o excitador	46
Figura 3.6 - (a) Interferômetro TALYSURF CLI 2000 do Laboratório de Tecnologia de Atrito e Desgaste, (b) amostra de alumínio durante a medição.....	47
Figura 3.7 – Interface gráfica do programa TALYSURF CLI 2000	48
Figura 3.8 - Diagrama de bloco do sistema de medição utilizado	50
Figura 3.9 - Equipamentos que compõem o sistema de medição utilizado para monitoramento das vibrações (1) acelerômetro piezelétrico <i>PCB</i> , (2) excitador, (3) analisador de sinais, (4) condicionador de sinais, (5) amplificador de sinais, (6) gerador de sinais e (7 e 8) computadores para monitoramento da vibração e coleta da rugosidade respectivamente.....	50
Figura 3.10 – Posicionamento do acelerômetro na base de acrílico	51
Figura 3.11 - Diagrama de bloco com as informações para simulação no Excel 2007	60
Figura 3.12 - Janela para geração de números aleatórios no Excel 2007	60
Figura 3.13 – Distribuições disponíveis no EXCEL, 2007 para a simulação de números aleatórios	61
Figura 4.1 - Perfil efetivo de rugosidade da amostra de alumínio na medição 1	64
Figura 4.2 - Curva de Abbott Firestone para a amostra de alumínio na medição 1	64
Figura 4.3 - Imagem sem processamento da superfície da amostra de alumínio área de 1,0 mm ²	65
Figura 4.4 - Imagem da superfície da amostra de alumínio após o nivelamento	65
Figura 4.5 - Topografia da superfície da amostra de alumínio	66
Figura 4.6 - Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de alumínio	66
Figura 4.7 - Valores de rugosidade obtidos por ambos os métodos com contato e sem contato para a amostra de alumínio, na condição sem vibração	67
Figura 4.8 - Histogramas obtidos na avaliação da incerteza de medição por meio do MMC na medição da amostra de alumínio com contato e sem vibração.....	68

Figura 4.9 - Incerteza expandida associada à medição da amostra de alumínio, sem vibração.....	69
Figura 4.10 - Perfil efetivo de rugosidade da amostra de aço inox na medição 1	70
Figura 4.11 - Curva de Abbott Firestone para a amostra de aço inox na medição 1	70
Figura 4.12 - Imagem sem processamento da superfície da amostra de aço inox, área de 1,0 mm ²	71
Figura 4.13 - Superfície da amostra de aço inox após nivelamento e eliminação de poros	71
Figura 4.14 - Topografia da superfície da amostra de aço inox, área de 1,0000 mm ²	72
Figura 4.15 - Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de aço inox	72
Figura 4.16 - Valores sem contato e com contato para a amostra de aço inox, na condição sem vibração	73
Figura 4.17 - Valores de incerteza obtidos na medição com e sem contato para a amostra de aço inox, na condição sem vibração	74
Figura 4.18 - Imagem sem processamento da superfície da amostra de aço carbono, área de 1,0 mm ²	75
Figura 4.19 - Topografia da superfície da amostra de aço carbono, área de 1,0 mm ²	75
Figura 4.20 - Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de aço carbono	76
Figura 4.21 - Perfil efetivo obtido na medição da amostra de aço carbono após a aplicação do filtro de Abbott Firestone.....	76
Figura 4.22 - Valores de rugosidade obtidos sem contato e com contato para a amostra de aço carbono, na condição sem vibração	77
Figura 4.23 - Valores de incerteza expandida associados à medição sem contato e com contato para a amostra de aço carbono, na condição sem vibração	77
Figura 4.24 - Diferenças percentuais entre os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos sem contato e com contato para as três amostras	78
Figura 4.25 - Espectros de frequência das quatro condições do pré-teste	79
Figura 4.26 - Valores médios e desvios-padrão dos parâmetros Ra, Rq, Rz e Rt nas cinco condições investigadas	80
Figura 4.27 - Valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade durante os pré-testes (95,45%)	81
Figura 4.28 - Valores de rugosidade e desvio padrão para a amostra de alumínio – 60 Hz	83

Figura 4.29 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de alumínio – 80 Hz.....	84
Figura 4.30 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de alumínio – 100 Hz....	86
Figura 4.31 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 60 Hz	87
Figura 4.32 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 80 Hz.....	87
Figura 4.33 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 100 Hz.....	88
Figura 4.34 - Valores de rugosidade e desvio padrão para a amostra de aço inox – 60 Hz	89
Figura 4.35 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço inox – 80 Hz.....	91
Figura 4.36 - Valores de rugosidade e desvio padrão para amostra de aço inox – 100 Hz.	92
Figura 4.37 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 60 Hz	94
Figura 4.38 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 80 Hz.....	94
Figura 4.39 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 100 Hz	95
Figura 4.40 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço carbono – 60Hz	96
Figura 4.41 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço carbono – 80 Hz.	97
Figura 4.42 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço carbono- 100 Hz	98
Figura 4.43 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 60 Hz	99
Figura 4.44 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 80 Hz.....	100
Figura 4.45 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 100 Hz.....	100
Figura 4.46 - Valores de rugosidade da amostra de alumínio para as diferentes frequências e acelerações	101
Figura 4.47 - Valores de rugosidade da amostra de aço inox para as diferentes frequências e acelerações	102
Figura 4.48 - Valores de rugosidade da amostra de aço carbono para as diferentes frequências e acelerações	103
Figuras A1.1 - Imagem da superfície da amostra de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 100 μm)	115
Figura A1.2 - Imagem da amostra de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 20 μm)	116
Figura A1.3 - Imagem da amostra de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 10 μm)	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros usados para avaliar a rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002)	8
Tabela 2.2 – Curvas e parâmetros relacionados (NBR ISO 4287, 2002)	9
Tabela 2.3 – Comprimentos de amostragem (NBR ISO 4288, 2008)	17
Figura 2.4 - Comprimentos de amostragem de rugosidade para perfis periódicos e não periódicos (NBR ISO 4288, 2008)	17
Tabela 2.5 – Unidade do SI usadas em vibrações (ABNT NBR ISO 80000-1, 2011)	21
Tabela 2.6 – Quadro de ANOVA	41
Tabela 3.1- Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo 3^2	53
Tabela 3.2 – Funções utilizadas durante a simulação (EXCEL, 2007)	61
Tabela 4.1- Valores médios dos parâmetros R_a , R_q , R_z e R_t e desvios-padrão associados (s)	80
Tabela 4.2 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e o teste significância	81
Tabela 4.3 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz	84
Tabela 4.4 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 80 Hz	85
Tabela 4.5 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 100 Hz	86
Tabela 4.6 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz	90
Tabela 4.7 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 80 Hz	92
Tabela 4.8 - Quadro Resumo da ANOVA e teste significância para 100 Hz	93
Tabela 4.9 - Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz	96
Tabela 4.10-Valores de p obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 80 Hz	98
Tabela 4.11- Quadro Resumo da ANOVA e teste significância para 100 Hz	99

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a	Aceleração
a_{ref}	Nível de referência
A	Amplitude
AI	Aço inox
AL	Alumínio
AC	Aço carbono
a	Metade do comprimento da base de um retângulo ou de um triângulo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
CIPM	Comitê Internacional de Pesos e Medidas
C	Incerteza associada à calibração do rugosímetro
C0	Condição sem vibração
D	Deformação da peça durante a medição
f	Função matemática que engloba todas as variáveis do processo de medição
FDP	Função densidade de probabilidade
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
IC	Incerteza associada à calibração do rugosímetro
ICi	Incerteza associada à calibração do interferômetro
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
k	Fator de abrangência
LMD	Laboratório de Metrologia Dimensional
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

L_e	Comprimento de amostragem
L_i	Limite inferior do intervalo
L_s	Limite superior do intervalo
L_m	Comprimento de avaliação
L_t	Comprimento total de medição
L_v	Comprimento para atingir a velocidade de medição
L_n	Comprimento para parada do apalpador
M	Número de iterações
MMC	Método de Monte Carlo
n	Número de elementos da amostra
N	Número de variáveis de influência
N	Valor em decibel
p	Probabilidade
P	Valor médio do parâmetro avaliado
$p(x_i)$	Função densidade de probabilidade
PR	Parâmetro de rugosidade
r	Raio da ponta da agulha
R	Resolução do rugosímetro
R_i	Resolução do interferômetro
$r(x_i, x_j)$	Grau de correlação entre x_i e x_j
R_p	Altura máxima do pico do perfil
R_v	Profundidade máxima do vale do perfil
R_z	Altura máxima do perfil
R_t	Altura total do perfil
R_a	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
R_q	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
RSk	Fator de assimetria do perfil avaliado (skewness)
RSm	Largura média dos elementos do perfil
s	Desvio padrão experimental
$s(L)$	Desvio padrão dos valores indicados pelo rugosímetro
s^2	Variância amostral
$s(L_i)$	Desvio padrão dos valores indicados pelo interferômetro

GLT	Número total de graus de liberdade
SQT	Soma dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média
t	Tempo
$u(x)$	Incerteza padrão da variável x
$U(C)$	Incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro
$U(C_i)$	Incerteza expandida associada à calibração do interferômetro
$u(C)$	Incerteza padrão associada à calibração do rugosímetro
$u(C_i)$	Incerteza padrão associada à calibração do interferômetro
u_c	Incerteza padrão combinada
U	Incerteza expandida
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
v	Velocidade
x_i	Estimativa da variável X_i
\bar{x}_l	Média aritmética dos M valores atribuídos a x_i
X	Abcissa do ponto do perfil
x	Deslocamento
y	Média aritmética dos M valores do mensurando obtidos durante a simulação de Monte Carlo
\bar{y}	Estimativa do valor médio de Y
$\bar{\bar{y}}$	Média global
$Z(x)$	Ordenadas dos pontos do perfil de rugosidade medidas a partir da linha média
Z	Ordenada do ponto do perfil
β	Metade do comprimento da base menor de um trapézio
ω	Frequência
δT	Variação da temperatura durante a etapa de medição
ΔR	Correção devido à resolução do rugosímetro
$\Delta I C$	Correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro
ΔD	Correção associada à deformação do material durante a medição
$\Delta s(L)$	Correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo rugosímetro

$\Delta I C_i$	Correção associada à incerteza da calibração do interferômetro
ΔR_i	Correção devido à resolução do interferômetro
$\Delta s(L_i)$	Correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo interferômetro
ΔT	Afastamento da temperatura em relação a 20°C
δT	Variação da temperatura durante o processo de medição
λ_c	Comprimento de onda (<i>cut-off</i>)
μ	Média de uma distribuição normal
σ^2	Variância populacional
ν_{ef}	Grau de liberdade efetivo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. <i>Objetivo principal</i>	3
1.1.2. <i>Objetivos secundários</i>	3
 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 5
2.1. Rugosidade	5
2.1.1- <i>Métodos para medição de rugosidade</i>	9
2.1.2 - <i>Parâmetros de rugosidade</i>	12
2.1.3 - <i>Crítérios para avaliar a rugosidade</i>	16
2.2. Vibração mecânica	18
2.2.1 - <i>Quantificação do nível de vibração</i>	20
2.2.2 – <i>Equipamentos utilizados na medição de vibração</i>	21
2.2.3 - <i>Escala de medidas</i>	23
2.3. Incerteza de medição	24
2.3.1. <i>Avaliação da incerteza-padrão tipo A e B</i>	25
2.3.2. <i>Incerteza-padrão combinada</i>	29
2.3.3. <i>Avaliação da incerteza expandida</i>	30
2.3.4. <i>Limitações de aplicação do ISO TAG 4WG 3 (2008)</i>	31
2.4. Método de Monte Carlo	32
2.4.1 <i>Determinação do número de iterações</i>	34
2.4.2 <i>Avaliação do modelo</i>	35
2.4.3 <i>Representação discreta da distribuição da função para a variável de saída</i> .	35
2.4.4 <i>Estimativa da variável de saída e da incerteza padrão associada</i>	35
2.4.5 <i>Intervalo de abrangência para a variável de saída</i>	36
2.5. Planejamentos de Experimentos	36
2.5.1 <i>Princípios básicos do planejamento de experimentos</i>	37

2.5.2 Roteiro para a realização de um bom experimento	38
2.5.3 - Análise de variância	38
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	42
3.1. Medição da rugosidade na condição C0 (sem vibração)	43
3.1.1. Medição com contato da rugosidade	43
3.1.2. Medição da rugosidade sem contato	47
3.2. Pré-testes	49
3.2.1. Medição da rugosidade	49
3.2.2. Medição da vibração	49
3.3. Planejamento dos Experimentos	52
3.3.1. Definição dos objetivos do experimento.....	52
3.3.2. Seleção das variáveis de controle e de resposta.....	52
3.3.3. Definição do planejamento de experimento	53
3.3.4. Seleção da matriz experimental	53
3.4. Análise estatística por meio da ANOVA	54
3.5. Avaliação da incerteza de medição	54
3.5.1. Identificação das variáveis de influência	55
3.5.2. Adoção do tipo de distribuição	56
3.5.3. Definição dos modelos matemáticos	58
3.5.4. Determinação do número de iterações para aplicação do MMC	59
3.5.5. Geração de números aleatórios	59
3.5.6. Obtenção dos valores do mensurando	62
3.5.7. Obtenção da FDP do mensurando, o desvio padrão, os limites do intervalo de abrangência para um dado nível de confiança e a incerteza	62
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1. Resultados da medição da rugosidade na condição C0, sem vibração	63
4.1.1. Resultados da medição com contato da amostra de alumínio. Sem vibração	63
4.1.2. Resultados da medição sem contato da amostra de alumínio. Sem vibração	65
4.1.3. Resultados da medição com contato da amostra de aço inox. Sem vibração	69
4.1.4. Resultados da medição sem contato da amostra de aço inox. Sem vibração	71
4.1.5. Resultados da medição com contato da amostra de aço carbono. Sem	

<i>vibração</i>	74
4.1.6. <i>Resultados da medição sem contato de amostra de aço carbono. Sem</i> <i>vibração</i>	74
4.2. Resultados dos pré-testes	79
4.3. Resultados do experimento fatorial completo 3^2	82
4.3.1. <i>Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para amostra de</i> <i>alumínio</i>	82
4.3.2. <i>Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para amostra de aço Inox</i>	89
4.3.3. <i>Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para a amostra de aço</i> <i>carbono</i>	95
4.3.4. <i>Comparação dos resultados do experimento fatorial completo 3^2</i>	100
 CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	105
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
 APÊNDICES	114
APÊNDICE 1. Imagens obtidas no MEV da amostra de alumínio	115
 ANEXOS	117
ANEXO 1. Certificado de calibração do rugosímetro	118
ANEXO 2. Certificado de calibração do termo-higrômetro.....	120
ANEXO 3. Certificado de calibração do acelerômetro	122

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza o tema “Influência da Vibração na Medição da Rugosidade” no universo da Engenharia Mecânica, mostrando sua relevância, objetivos e justificativa.

Toda operação realizada por meio dos processos de fabricação mecânica tem como objetivo produzir componentes intercambiáveis com a máxima funcionalidade a custo conveniente. Isto significa que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito conforme as especificações de projeto, em especial as relativas às dimensões, forma e acabamento superficial. Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos alcançados nas últimas décadas esse objetivo é impossível de ser atingido. A superfície de uma peça sempre apresentará os chamados desvios macro e microgeométricos decorrentes dos processos de fabricação (JUNEJA; SWKHON, 1987; SHAW, 1984; SCHAFFER, 1988; DROZDA; WICK, 1983).

A impossibilidade de se obter superfícies perfeitas dimensional e geometricamente criou a necessidade de quantificar e indicar, no projeto das peças, as tolerâncias dimensionais e geométricas e, conseqüentemente, desenvolver meios para verificá-las.

Em particular, as tolerâncias geométricas são aplicadas para limitar os valores dos desvios macro e/ou microgeométricos. Dentre os desvios macrogeométricos têm-se os desvios de forma, que incluem divergências de ondulações, ovalização, retitude, circularidade, planeza, entre outros, que podem ser verificados através de instrumentos convencionais (JANG *et al.*, 1996). Já os desvios microgeométricos, conhecidos como rugosidade, são pequenas saliências e reentrâncias presentes na superfície da peça (PIRATELLI-FILHO, 2011).

Devido ao caráter micro-geométrico da rugosidade sua medição requer o uso de equipamentos especificamente desenvolvidos para esse fim, sendo que a mesma pode ser

efetuada com contato e sem contato. Ainda, o aparelho mais utilizado é o rugosímetro eletromecânico, devido principalmente a sua portabilidade (NOVASKI, 1994).

Durante a medição da rugosidade com rugosímetros eletromecânicos com medição por contato diversos fatores podem influenciar os resultados. Dentre eles, tem-se o instrumento de medição, a peça, o operador, a estratégia de medição e o meio ambiente. Leach (2001) evidencia que as condições ambientais de chão de fábrica (gradientes térmicos, pó, sujeira e vibração) podem influenciar os valores de rugosidade e até invalidá-los.

A norma ABNT NBR ISO 3274 (2008) especifica as condições nominais para medir a rugosidade utilizando instrumentos com apalpadores.

Segundo Zahwi *et al.*, (2003), desvios destas condições nominais conduzem a desvios significativos dos valores dos parâmetros de rugosidade. Para valores de rugosidade pequenos, da ordem de alguns décimos de micrometros, a medição com instrumentos com apalpadores torna-se difícil, pois a amplitude da vibração presente no ambiente pode ser da mesma ordem de grandeza que a rugosidade (LYNCÉE TEC, 2012). Desta forma, a medição da rugosidade com instrumentos com apalpadores 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. Neste ambiente os níveis de vibração podem ser elevados devido à presença de grande quantidade de equipamentos e máquinas-ferramenta.

Na literatura estudada foram encontrados estudos sobre a influência da vibração no acabamento superficial de peças durante processos de usinagem (AMORIM, 2002; FACCIO, 2002; NUNES, 2011). Fatores como a velocidade de corte, raio da ponta da ferramenta, rigidez da máquina ferramenta, entre outros, resultam em vibrações inerentes ao processo de corte que fazem toda a diferença no perfil de rugosidade obtido na peça usinada. Estes fatores influenciam na avaliação da qualidade da operação de usinagem (NUNES, 2011).

Entretanto, trabalhos que abordem o estudo, avaliação e quantificação da influência das vibrações na medição da rugosidade, são raros. Potenciano (2013) avaliou a influência da vibração na medição da rugosidade. Os resultados demonstraram que as vibrações provenientes do próprio rugosímetro, do sistema de condicionamento de ar, do tipo de suporte do rugosímetro e da superfície de referência (apoio) podem influenciar os valores dos parâmetros de rugosidade e a incerteza a eles associada. Mas, a autora não determinou a amplitude da vibração, nem quantificou a contribuição desta na incerteza final.

Sendo assim, este trabalho teve a pretensão de aprofundar estes estudos no sentido de identificar como a vibração mecânica influencia nos valores dos parâmetros de rugosidade, bem como, avaliar a influência da vibração na incerteza final da medição destes parâmetros.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Este trabalho objetiva identificar e avaliar o efeito da interferência produzida por vibração mecânica sobre os valores médios dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_t) e da incerteza associada à medição da rugosidade com vibração por meio de um rugosímetro eletromecânico modelo TR200 – HOMIS

1.2.2. Objetivos Secundários

- Estabelecer procedimentos experimentais para aquisição de dados, por meio dos quais seja possível detectar o efeito da vibração mecânica nos resultados da medição da rugosidade;
- Quantificar a contribuição dos efeitos da vibração mecânica na incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade;
- Contribuir para a correta utilização do sistema de medição da rugosidade.
- Assegurar a confiabilidade dos resultados dos processos de medição da rugosidade, contribuindo com a rastreabilidade dos resultados da medição da rugosidade aos padrões nacionais e internacionais.

Este trabalho constitui-se de mais quatro capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre rugosidade abrangendo os conceitos e definições relacionados ao processo de medição, bem como dos parâmetros utilizados para avaliação da rugosidade e das normas vigentes sobre o assunto. Conceituação e definição de elementos relativos à vibração mecânica. Apresentação da metodologia de cálculo de incerteza da medição e de noções básicas sobre planejamento de experimentos e ANOVA.

Capítulo 3: Apresenta a metodologia proposta para desenvolvimento do trabalho, a qual é composta das seguintes etapas: a) medição dos parâmetros de rugosidade em três peças em condições sem vibração por meio de um rugosímetro eletromecânico e de um interferômetro;

b) pré-testes, que consistiram na medição da rugosidade e da vibração de forma simultânea em uma peça de alumínio considerando uma banda de frequência de 50 Hz a 150 Hz e quatro níveis de aceleração; c) planejamento fatorial 3^2 no qual foram medidos R_a , R_q , R_z e R_t em três peças considerando como variáveis independentes a frequência e a aceleração, ambas em três níveis; d) análise de variância para verificar se as diferenças observadas entre os valores médios de um dado parâmetro de rugosidade são significativas ou não e e) avaliação da incerteza de medição utilizando o método de Monte Carlo.

Capítulo 4: Análise e discussão dos resultados obtidos por meio dos experimentos realizados.

Capítulo 5: Elaboração das conclusões e considerações finais, bem como, de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para desenvolvimento do trabalho, são eles: rugosidade, enfatizando as normas técnicas atualmente em vigor (ABNT NBR ISO 4287, 2002 e ABNT NBR ISO 4288, 2008); vibrações mecânicas, incerteza de medição e planejamento experimental com análise estatística (ANOVA) utilizando o programa Statistic 7.

2.1. Rugosidade

Observando uma pequena parte de uma superfície real, nota-se que ela é composta de rugosidade (textura primária), ondulação (textura secundária) e desvio de forma macrogeométricos, conforme Fig. 2.1.

Os desvios de forma são divididos em dois grupos, a saber: desvios macrogeométricos e microgeométricos. Os desvios macrogeométricos incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retitude, planeza, circularidade, entre outros e podem ser verificados por meio de instrumentos convencionais de medição, como relógios comparadores.

Por sua vez, os desvios microgeométricos ou rugosidade são definidos como a soma das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem. Diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens são diferenças que se repetem, regular ou irregularmente, cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

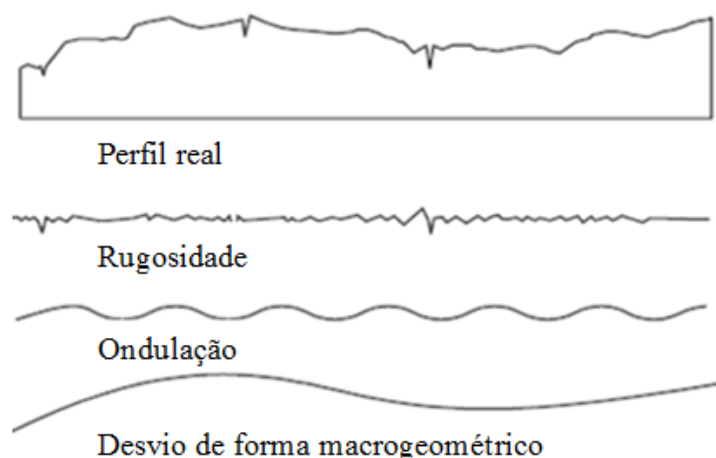


Figura 2.1 – Composição da superfície (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

A definição apresentada por Agostinho; Rodrigues; Lirani, (1977) destaca que a rugosidade é decorrente dos processos de usinagem, o que torna esta definição limitada. As superfícies de peças obtidas por outros processos de fabricação tais como laminado, estampado, fundição e soldagem, também, apresentam certos valores de rugosidade. Assim sendo, neste trabalho adota-se uma definição mais abrangente da rugosidade, dada por Piratelli-Filho (2011). Para este autor a rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

A Figura 2.2 mostra um exemplo do conjunto das irregularidades causado pela ferramenta de corte durante o processo de fabricação de uma peça, isto é, os sulcos ou marcas deixados pela ferramenta.

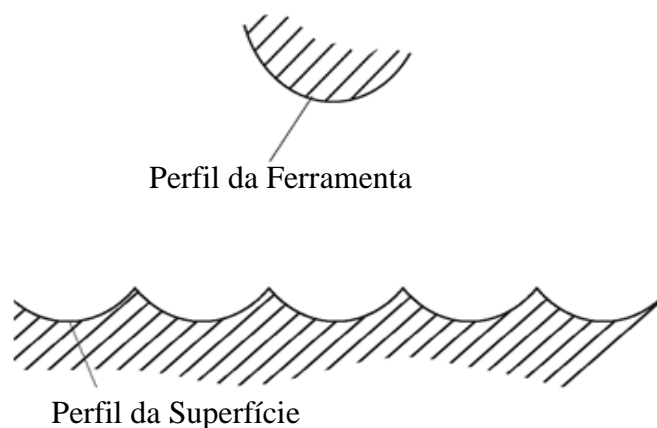


Figura 2.2 – Marcas deixadas pela ferramenta na superfície (TAYLOR HOBSON, 2003)

Pode-se observar na Fig. 2.2 que quando a ferramenta passa imprime sua forma na superfície da peça. Consequentemente, para processos de usinagem como o torneamento, plainamento e fresamento, onde a ferramenta de corte possui geometria específica e bem definida, se produzem na superfície da peça geometrias ou sulcos com características relativas àquela especificidade da ferramenta. Vale destacar que outros fatores como a profundidade de corte e o avanço da ferramenta influenciam a profundidade dos sulcos e o espaçamento entre eles, respectivamente.

Para medir a rugosidade são usados dois sistemas de medição: o da linha média e o da envolvente. O sistema da linha média é o mais utilizado. Alguns países adotam ambos os sistemas. No Brasil se utiliza o sistema da linha média, que se baseia no seguinte conceito.

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

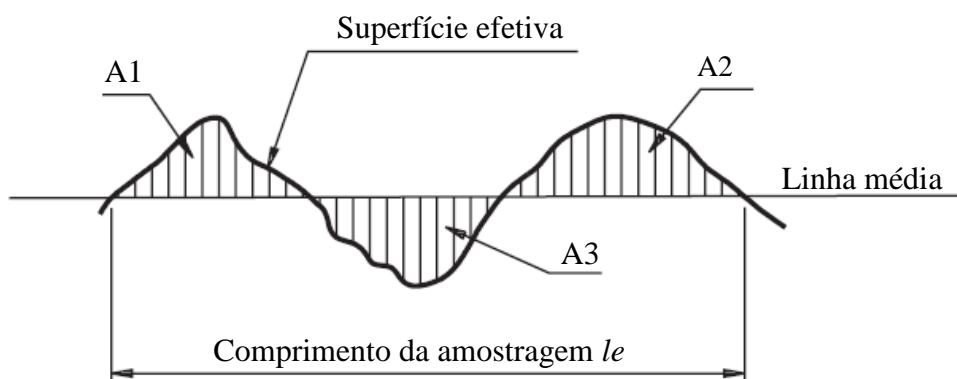


Figura 2.3 – Linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)

A partir do conceito de linha media a ABNT NBR ISO 4287 (2002) define três grupos de parâmetros geométricos que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade, que são: parâmetros de amplitude; parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos.

- 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 (2002) fornece, ainda, o nome e o símbolo destes parâmetros (Tab. 2.1) e algumas curvas que podem ser utilizadas para avaliar a rugosidade, Tab.2.2.

Tabela 2.1 – Parâmetros usados para avaliar a rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

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

Tabela 2.2 – Curvas e parâmetros relacionados (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

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

2.1.1 - Métodos para medição de Rugosidade

A avaliação da rugosidade pode ser efetuada de diferentes formas, dentre elas: Comparação visual e tátil (Fig. 2.4). Consiste no contato físico da ponta dos dedos do operador com a superfície da peça a ser analisada e com a superfície de um padrão, que necessariamente deve ser do mesmo material e obtido pelo mesmo processo de fabricação que a peça avaliada. Este tipo de avaliação se caracteriza pela simplicidade e o baixo custo.

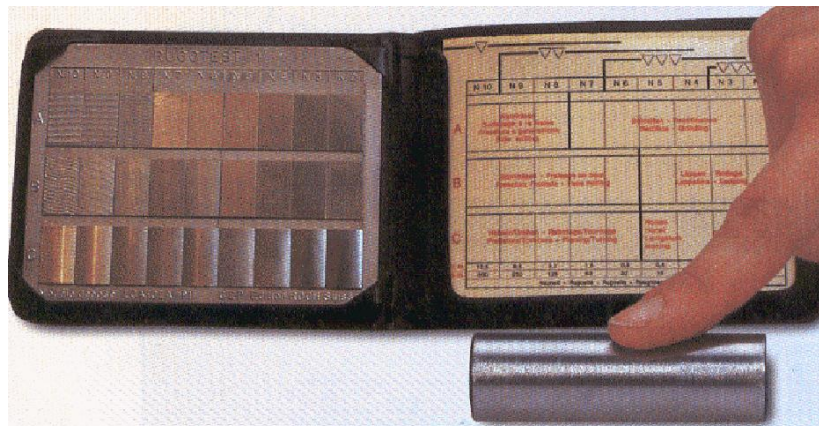


Figura 2.4 – Avaliação visual e tátil da rugosidade utilizando padrões (TAYLOR HOBSON, 2003)

Para efetuar uma avaliação mais detalhada e precisa da rugosidade devem ser utilizados rugosímetros, que podem ser eletromecânicos (Fig. 2.5), óticos e a laser (Fig. 2.6), sendo que os mais utilizados são os aparelhos eletromecânicos (NOVASKI, 1994). Nestes últimos uma

agulha faz a varredura da superfície fornecendo o perfil de rugosidade, caracterizando esta medição como sendo medição de contato, comumente utilizado na indústria (CHAND *et al.*, 2011).



Figura 2.5 – Rugosímetro eletromecânico digital (TAYLOR HOBSON, 2003)

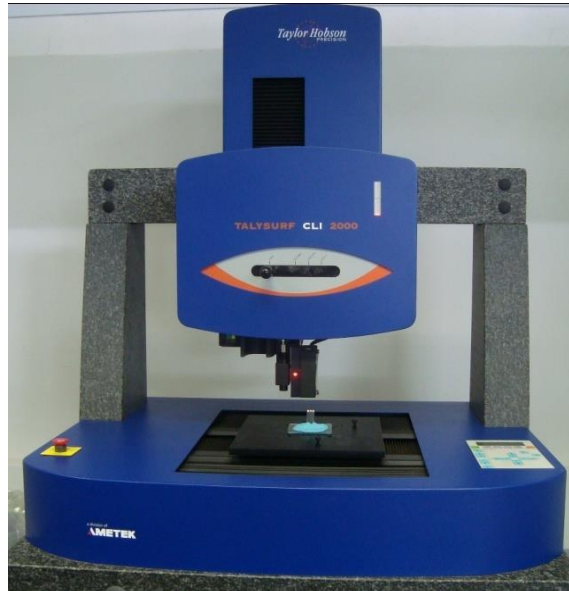


Figura 2.6 - Interferométrico com luz branca e laser (medição sem contato) e agulha de diamante (medição com contato) (ARENCIBIA *et al.*, 2011)

O princípio de funcionamento de um rugosímetro eletromecânico consiste de uma ponta (agulha) que entra em contato físico com a superfície a ser medida e um transdutor piezelétrico que converte o movimento vertical desta em um sinal elétrico (LEACH, 2001).

A agulha do rugosímetro é fabricada de diamante sintético, por ser um material duro e resistente. A geometria da ponta pode ser cone-esférica ou tipo pirâmide truncada. Dentre as limitações da medição da rugosidade com contato está a impossibilidade de obter-se o perfil real devido às dimensões da ponta da agulha (Fig. 2.7). Desta forma o perfil efetivo sempre apresentará distorções com relação ao perfil real devido a que o raio de curvatura dos picos pode ser aumentado e os vales podem não ser detectados e/ou representados como cúspides (BHUSHAN, 2002).

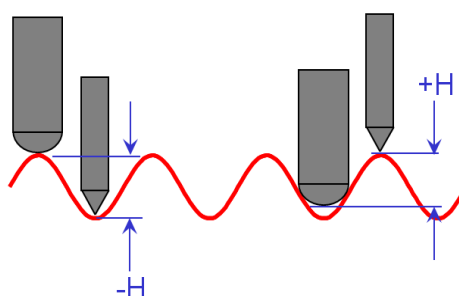


Figura 2.7 – Influência das dimensões da ponta da agulha na obtenção do perfil de rugosidade (TAYLOR HOBSON, 2003)

Outra limitação da medição devido ao contato da ponta da agulha, mesmo sob cargas baixas resulta em uma área de contato tão pequena que a pressão local pode ser suficientemente elevada para provocar uma deformação elástica significativa da superfície medida. Em alguns casos a pressão local pode exceder a dureza do material provocando uma deformação plástica. Para materiais dúcteis como alguns aços, prata, ouro, chumbo e elastômeros podem ser observados riscos na superfície após a medição (POON; BHUSHAN, 1995).

Com relação à força de medição, esta depende da geometria da superfície, da constante de mola utilizada e da velocidade de movimentação da agulha. A força de medição estática da ponta, geralmente é definida pelo fabricante, e assume 0,75 mN, de acordo com a ABNT NBR ISO 3274 (2008).

Outro aspecto importante da medição da rugosidade é a direção de apalpação, que deve ser definida conforme a orientação 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 agulha passe por defeitos como riscos e 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.

A direção de apalpação influencia significativamente no formato do perfil resultante da medição de rugosidade (perfil efetivo) como pode ser observado na Fig. 2.8.

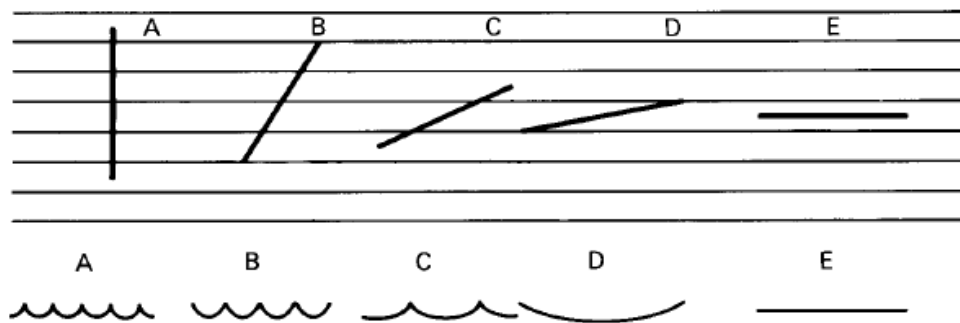


Figura 2.8 – Efeito da direção de apalpação no perfil efetivo da rugosidade (LEACH, 2001)

Observa-se na Fig. 2.8 que na medida em que a direção de apalpamento passa da posição perpendicular aos riscos (A) para a posição paralela aos riscos (E) o perfil resultante se deforma. Sendo que na posição E as características da rugosidade foram completamente eliminadas.

2.1.2 - Parâmetros de Rugosidade

Existem vários parâmetros que podem ser utilizados para avaliar a rugosidade das peças. A seguir, são apresentados apenas aqueles que fazem parte deste trabalho, são eles:

a) Desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a)

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, dentro do percurso de medição (l_m) conforme Eq. (2.1). Geometricamente, este parâmetro corresponde à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m), Fig. 2.9.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2.1)$$

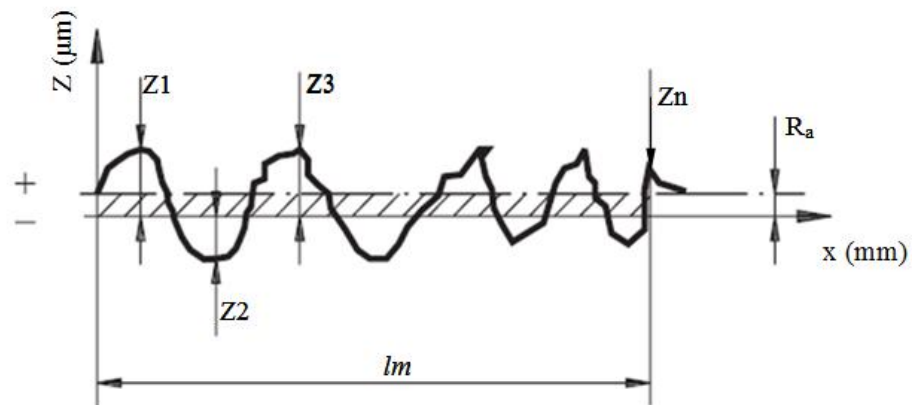


Figura 2.9 – Desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a) (PIRATELLI-FILHO, 2011)

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. 2.10 mostra superfícies diferentes que possuem o mesmo valor de R_a .

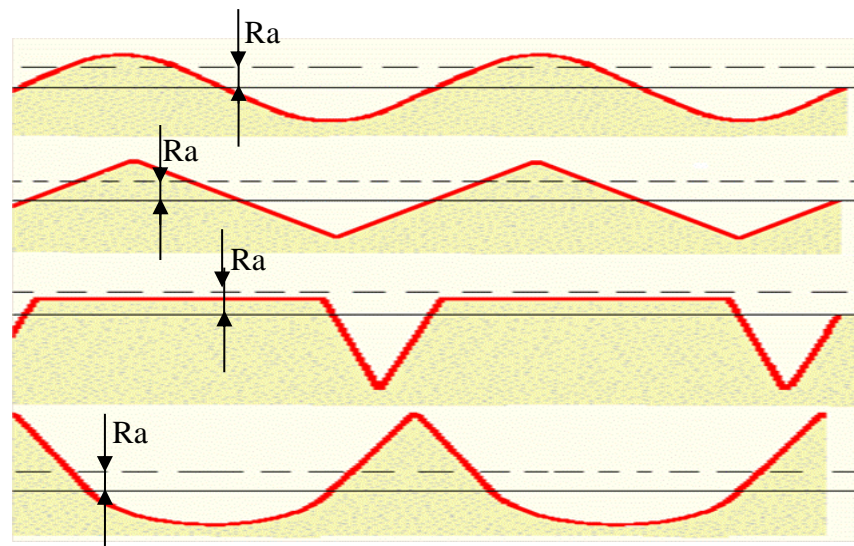


Figura 2.10 - Representação do R_a para perfis diferentes (TAYLOR HOBSON, 2003)

b) *Altura máxima do perfil (R_z)*

Este parâmetro é definido pela 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. 2.11.

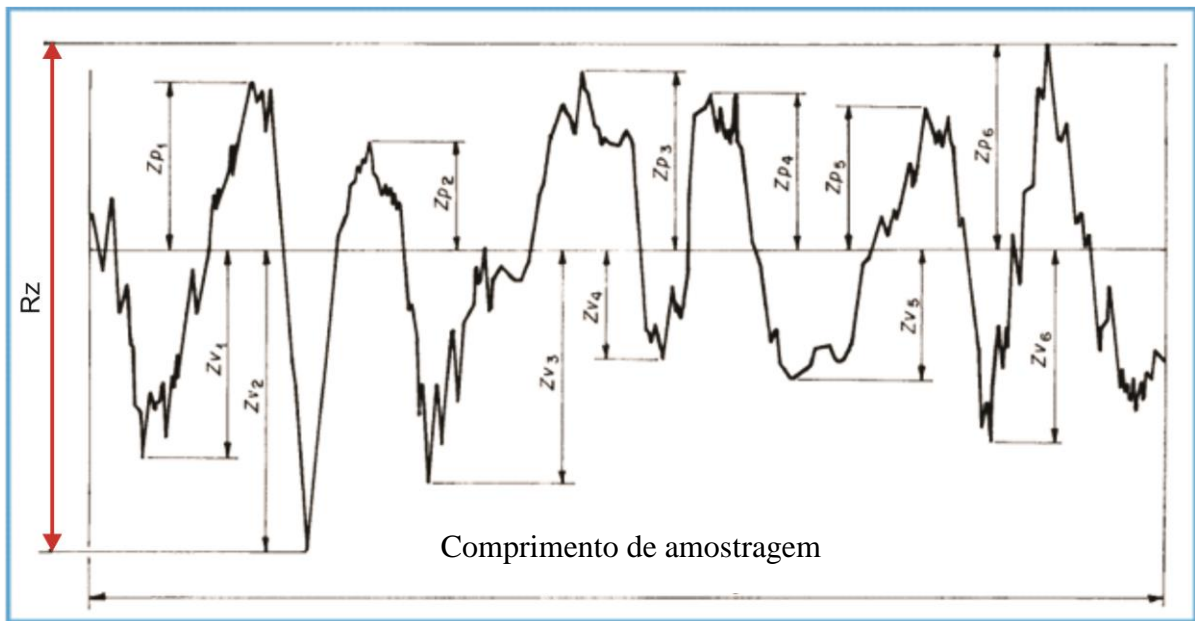


Figura 2.11 - Altura máxima do perfil (ABNT NBR 4287, 2002)

O parâmetro R_z pode passar uma informação equivocada da superfície, pois 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 Figura 2.12 mostra quatro perfis de rugosidade com o mesmo valor de R_z .



Figura 2.12 – Perfis de rugosidade com o mesmo valor de R_z (LEACH, 2001)

O parâmetro R_z pode ser empregado quando a presença de picos isolados não influencia o funcionamento da peça objeto de medição e em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido. Este parâmetro é de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos e para peças com perfis periódicos, define muito bem a superfície.

c) Altura total do perfil (R_t)

Este parâmetro resulta da soma das maiores alturas de pico e das maiores profundidades dos vales, definidos no comprimento de avaliação, e não apenas no comprimento de amostragem. 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).

O R_t é mais rígido na avaliação da superfície que o parâmetro R_z , permitindo uma maior facilidade na obtenção do gráfico da superfície, entretanto tal rigidez de avaliação pode permitir resultados enganosos.

d) R_q - Desvio médio quadrático do perfil avaliado

É definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, $Z(x)$, no comprimento de amostragem, Eq. (2.2).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.2)$$

O parâmetro R_q evidencia os picos e vales presentes na superfície, pois eleva ao quadrado o valor das ordenadas, ressaltando-os.

e) Curva de *Abbott Firestone* ou Curva da razão portante do perfil

É uma curva que representa a variabilidade do valor da razão de material em função da profundidade, permitindo distinguir diferentes formas do perfil (Fig. 2.13).

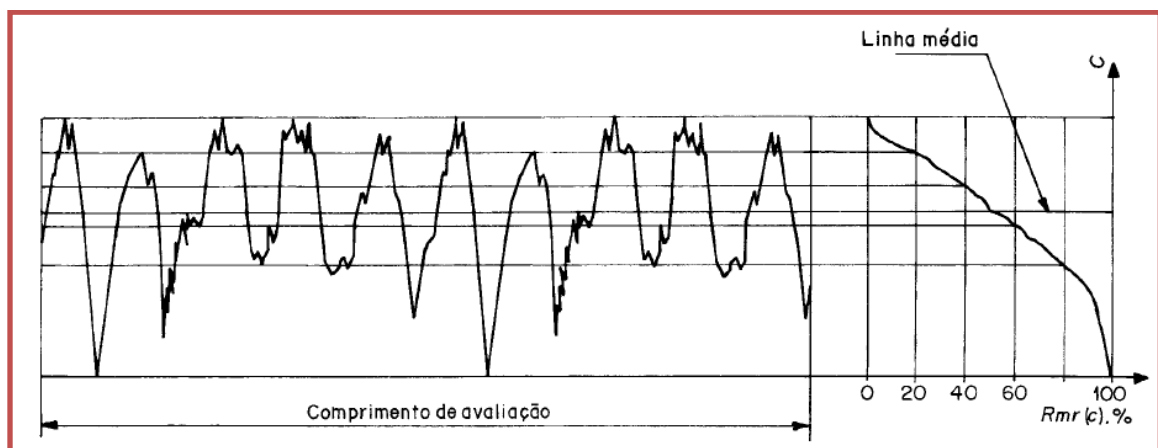


Figura 2.13 - Curva da razão portante do perfil (ABNT NBR 4287, 2002)

A Curva de *Abbott Firestone* é especialmente útil para avaliar superfícies de acoplamento que requerem funções tribológicas as quais são normalmente produzidas através de uma sequência de operações de usinagem. Como consequência os picos são removidos gradativamente, enquanto que os vales ficam intactos. Este processo conduz a um tipo de textura de superfície, conhecida como superfície estratificada e resulta difícil avaliar a rugosidade de forma eficaz utilizando um parâmetro individual, como o Ra (LEACH, 2001).

2.1.3 - Critérios para avaliar a rugosidade

Os desvios de forma macrogeométricos, as ondulações e a rugosidade se apresentam superpostos na superfície real da peça, sendo que os sinais de rugosidade apresentam altas frequências ou comprimentos de onda e as menores amplitudes quando comparados com as ondulações e os desvios macrogeométricos, que apresentam pequenas frequências e grandes amplitudes. Desta forma durante a medição da rugosidade devem ser aplicados filtros que permitam separar ou atenuar os sinais com frequências mais baixas e para tanto, os rugosímetros utilizam filtros denominados Filtros Passa-alta.

No processo de medição da rugosidade é adquirido um conjunto de valores individuais do parâmetro de rugosidade avaliado para um determinado comprimento de amostragem. Quando o comprimento de medição é posto como requisito, no processo de medição por apalpação, deve-se escolher o comprimento de onda *cut-off* igual ao comprimento de amostragem. Entretanto não havendo especificações a respeito da rugosidade ou então do comprimento de amostragem da mesma, o comprimento de onda *cut-off* deve ser escolhido considerando alguns fatores relatados na ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Ainda de acordo com a ABNT NBR ISO 4288 (2008), a medição dos parâmetros de um perfil de rugosidade não periódico deve ser feita a partir de uma estimativa do comprimento de amostragem, baseada também na estimativa de um parâmetro do perfil de rugosidade desconhecido. A Tabela 2.3 mostra os valores de comprimento de amostragem para o Ra.

No caso de um perfil de rugosidade periódico parte-se de uma estimativa gráfica do parâmetro RSm, da superfície com rugosidade desconhecida, para com o auxílio da Tab. 2.4 determine-se o comprimento de onda *cut-off* recomendado. Prosseguindo-se com a obtenção de medições representativas dos parâmetros desejados utilizando um valor de comprimento de onda *cut-off* ou comprimento de amostragem, previamente estimado.

Tabela 2.3 – Comprimentos de amostragem (ABNT NBR ISO 4288, 2008)

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

Tabela 2.4 – Comprimentos de amostragem de rugosidade para perfis periódicos e não periódicos (ABNT NBR ISO 4288, 2008)

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

Durante a avaliação da rugosidade com rugosímetros eletromecânicos, devem ser apalpados sete comprimentos de amostragem, sendo que a coleta dos dados é efetuada em cinco comprimentos de amostragem denominados comprimento de avaliação (Fig. 2.14).

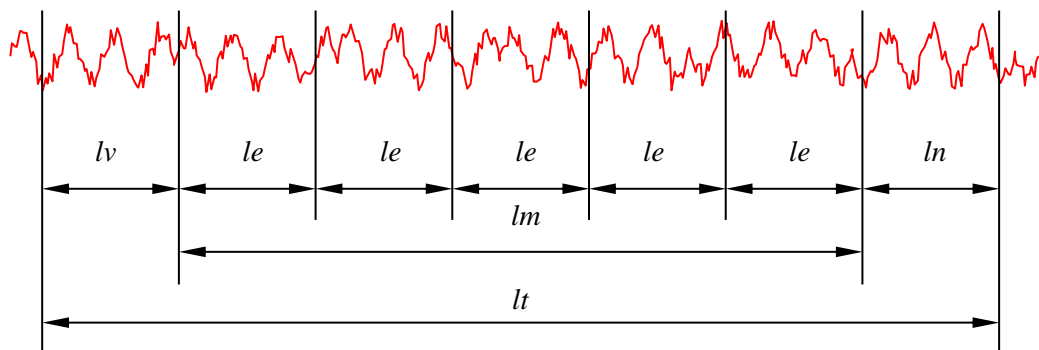


Figura 2.14 - Comprimentos para avaliação de rugosidade (NOVASKI, 1994). Modificada

Onde:

l_e : comprimento de amostragem ou *cut-off*

l_m : comprimento do percurso de medição;

l_t : comprimento total de medição

l_v : comprimento para atingir a velocidade de medição;

l_n : comprimento para parada do apalpador.

Pelo exposto observa-se que a medição da rugosidade possui algumas particularidades que a tornam passível de erros de medição e de incertezas significativas, dentre eles tem-se:

- a existência de vários parâmetros para avaliação da rugosidade, o que exige um amplo conhecimento a respeito dos conceitos utilizados para cálculo do valor numérico dos mesmos e para uma adequada análise e interpretação dos resultados obtidos;
- a existência na superfície da peça de uma mistura de rugosidade, ondulações e desvios de forma macrogeométricos que levam à necessidade de usar filtros para separar a rugosidade dos demais desvios;
- os valores numéricos dos parâmetros de rugosidade podem ser tão pequenos quanto a amplitude das vibrações mecânicas do ambiente, levando ao aparecimento de erros de medição significativos se estas não forem minimizadas.

2.2. Vibração mecânica

Um corpo é dito em vibração quando ele descreve um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência. O número de vezes de um ciclo completo de um movimento

durante um período de um segundo é chamado de frequência e é medido em Hertz [Hz] (FERNANDES, 2002).

O movimento segundo Fernandes (2002) pode consistir de um simples componente ocorrendo em uma única frequência, como um diapásão, ou muitos componentes ocorrendo em diferentes frequências simultaneamente, como por exemplo, o movimento do pistão de um motor de combustão interna (Fig. 2.15).

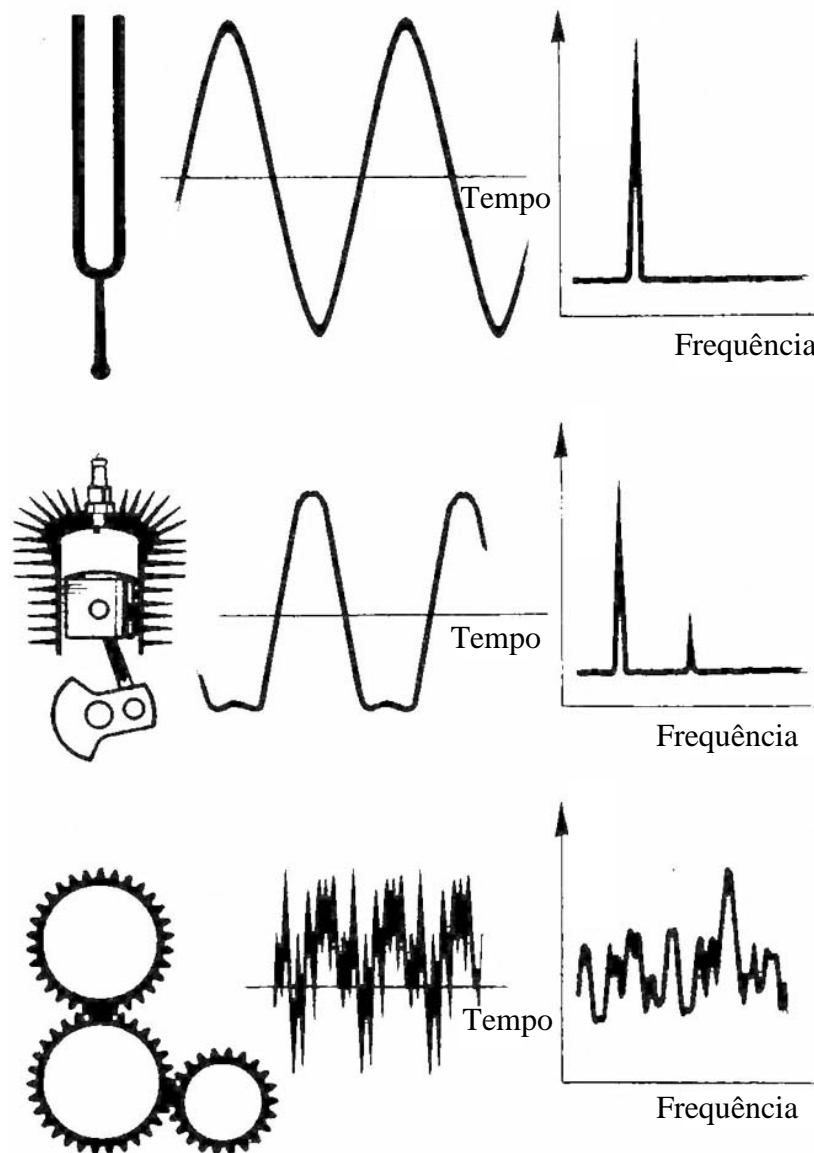


Figura 2.15 – Frequências fundamentais e harmônicas (FERNANDES, 2002).

Na prática, os sinais de vibração consistem em muitas frequências ocorrendo simultaneamente. Esses componentes podem ser visualizados em um gráfico de amplitude da

vibração em função da frequência. Durante o estudo e análise dos sinais de vibração especial atenção é dada ao estudo dos componentes individuais da frequência que é chamado de análise de frequência, uma técnica que pode ser considerada a principal ferramenta de trabalho nos diagnósticos de medida de vibração (FERNANDES, 2002). O gráfico mostrando o nível de vibração em função da frequência é chamado de espectrograma de frequência, Fig. 2.16.

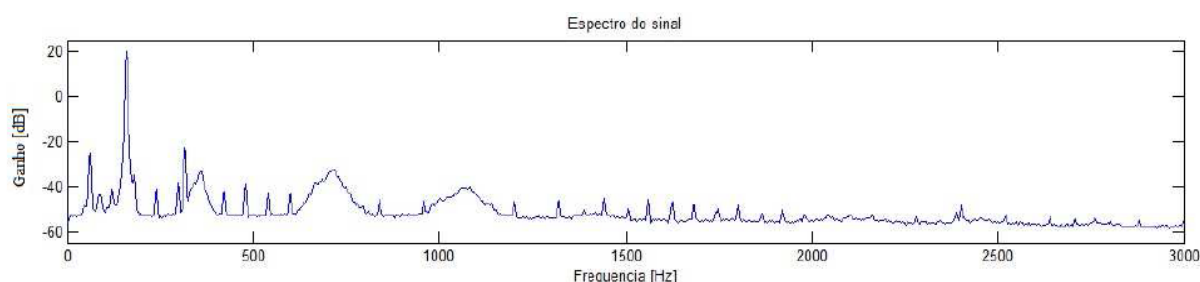


Figura 2.16 – Espectro de frequência (SANTOS, 2011)

A Figura 2.16 mostra o sinal no domínio da frequência (espectro de frequência) obtido por Santos (2011) durante a calibração dinâmica de um acelerômetro capacitivo ADXL321.

2.2.1- Quantificação do nível de Vibração

Conforme Regazzi e Ximenes (2005) a amplitude da vibração, que caracteriza e descreve o grau da vibração é definida como o deslocamento dos pontos de um diapasão para os dois lados de sua posição de equilíbrio. Podendo também ser caracterizado por sua velocidade e aceleração. A amplitude da vibração pode ser classificada pelo valor Pico-a-pico, valor de pico, valor médio e valor RMS ou nível quadrático médio de um sinal senoidal.

O valor pico-a-pico indica a máxima amplitude da onda e é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima de elementos de máquina. Já o valor de pico é usado na indicação de níveis de impacto de curta duração e o valor médio, quando se considera um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo. Por fim o valor RMS é a mais importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório. Portanto, mostra o potencial destrutivo da vibração (FERNANDES, 2000).

Os parâmetros de vibração são medidos em unidades métricas (Tab. 2.5), conforme a norma ABNT NBR ISO 80000-1 (2011).

Tabela 2.5 – Unidade do SI usadas em vibrações (ABNT NBR ISO 80000-1, 2011)

Unidade de vibração	
Deslocamento	m, mm, μm
Velocidade	m/s, mm/s
Aceleração	m/s^2 , sendo a constante gravitacional $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

A vibração mecânica pode ser medida em aceleração (m/s^2), velocidade (m/s) ou deslocamento (m), conforme as Eqs. (2.3 - 2.5).

$$x = A \sin \omega t \quad (2.3)$$

$$v = \dot{x} = \omega A \cos \omega t \quad (2.4)$$

$$a = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t \quad (2.5)$$

Onde:

x é o deslocamento;

v é a velocidade;

a é a aceleração;

A é a amplitude;

ω é a frequência em rad/s;

t é o tempo em s.

2.2.2 – Equipamentos utilizados na medição de vibração

Existem diferentes tipos de acelerômetros, por exemplo, ópticos, térmicos, capacitivos, por indução magnética, piezelétricos, entre outros. Estes são fabricados com diferentes tecnologias e possuem características específicas, que denotam suas diversas aplicações, vantagens e desvantagens (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

Entretanto, o transdutor universalmente usado na captação de uma vibração é o acelerômetro piezelétrico, que se caracteriza por ter uma banda dinâmica maior quando comparado a outros tipos de acelerômetros. Este possui boa linearidade e quando acoplado a

condicionadores de sinais específicos pode informar através do sinal da aceleração os sinais proporcionais à velocidade e o deslocamento (BARBARINI, 2007).

A essência de um acelerômetro piezelétrico é o material piezelétrico, quartzo, porém o mais usual é uma cerâmica ferro-elétrica artificialmente polarizada. Quando esta é mecanicamente tensionada gera uma carga elétrica proporcional à força aplicada, que polariza suas faces (Fig. 2.17).

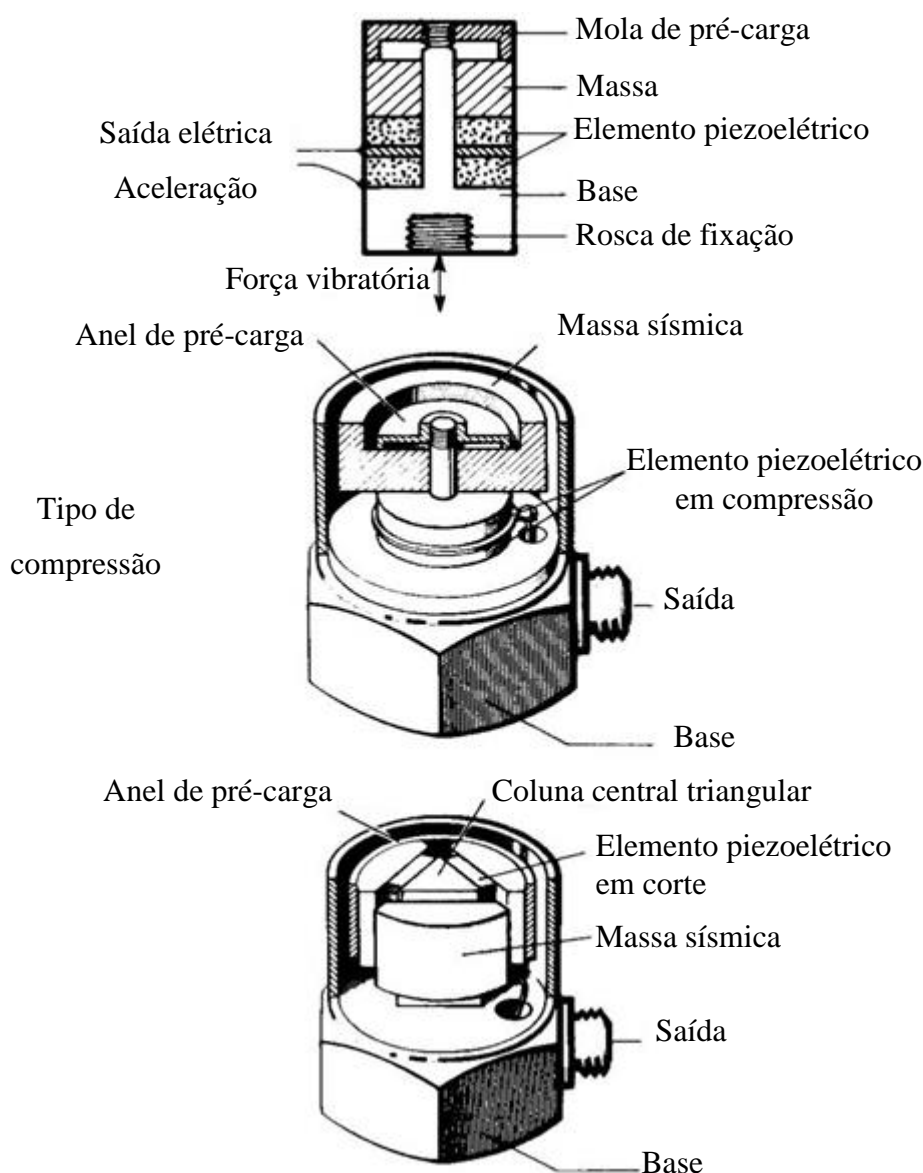


Figura 2.17 - Acelerômetro piezelétrico (FERNANDES, 2000)

Um aspecto muito importante durante a medição de vibração está na escolha do acelerômetro adequado para cada frequência a ser medida. Usa-se um medidor de vibração

conectado ao acelerômetro, que contém um pré-amplificador, que indica o nível RMS da aceleração ou velocidade ou deslocamento (BARBARINI, 2007).

2.2.3 - Escalas de medidas da vibração

Escala logarítmica são usadas para mostrar as amplitudes de vibração. Também é usada a escala decibel (dB) para comparar níveis. O decibel (dB) é a relação de um nível qualquer em relação ao nível de referência

A expressão para determinar os níveis em dB é dada na Eq. (2.6).

$$N(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{\text{ref}}} \right) \quad (2.6)$$

onde a é o nível de vibração a ser medido, a_{ref} é o nível de referência e N é o valor em decibel.

Os níveis de referência em decibel são fixados pela norma ISO R 1683 (2008).

Nível de aceleração – $a_{\text{ref}} = 10^{-6} \text{ m/s}^2$

Nível de velocidade – $a_{\text{ref}} = 10^{-9} \text{ m/s}$

Segundo Ripper *et al.* (2006), a confiabilidade das medições realizadas por meio de acelerômetros demanda o uso de métodos de medição de preferência padronizados, bem como instrumentação adequada à aplicação e devidamente calibrada. Ainda o pessoal que executa a medição deve ser qualificado. Segundo estes autores, o uso de equipamentos calibrados contribui também para obtenção de resultados rastreáveis.

A calibração de transdutores de vibração é abordada pelo conjunto de normas técnicas ISO 16063. Estas normas apresentam métodos de calibração primária, métodos de calibração comparativa e ensaios para determinação de características de transdutores para medição de vibrações e choque (RIPPER *et al.*, 2006).

No Brasil, os padrões nacionais primários para medição, na área de vibração, consistem basicamente em: um excitador de vibração para gerar movimento harmônico e não harmônicos senoidal, um sistema interferométrico para quantificar este movimento mecânico e instrumentação para medição do sinal de saída do transdutor sob calibração.

2.3. Incerteza de medição

O Guia intitulado “Expressão da Incerteza de Medição – Avaliação de dados de medição” publicado pelo INMETRO em 2012 é uma tradução do documento ISO TAG 4/WG 3 (2008), atualmente em vigor. Este Guia, Conhecido popularmente como GUM, estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição, as quais foram planejadas 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 Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) o tratamento do problema em conjunto com os laboratórios nacionais de metrologia e a elaboração de uma proposta. Desenvolver um documento orientador com base na recomendação do Grupo de Trabalho do BIPM sobre a Declaração de Incertezas que forneça regras sobre a expressão de incerteza de medição para ser usado em normalização, calibração, acreditação de laboratórios e serviços de metrologia;

O propósito de tal orientação é promover informação sobre como se chega a uma declaração da incerteza de medição e fornecer uma base para a comparação internacional de resultados de medição.

Quando o valor de um mensurando é relatado deve ser dada a melhor estimativa de seu valor acompanhada da melhor avaliação da incerteza associada a esta estimativa.

Portanto, ao se relatar o resultado de medição de qualquer grandeza física, é necessário fornecer uma indicação quantitativa da qualidade deste resultado, de maneira a permitir uma avaliação de sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou norma. É, portanto, necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e de ampla aceitação para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (ISO TAG 4WG 3, 2008).

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

São diversos os fatores que influenciam a incerteza total de medição e dependendo do tipo de ensaios e/ou calibrações contribuem com intensidades diferentes. Dentre as fontes de

incerteza, estão as variações associadas ao instrumento de medição, ao operador, às condições ambientais, às propriedades e condições físicas do elemento ensaiado, entre outros.

A avaliação e declaração da incerteza contribuem para a rastreabilidade dos valores obtidos, para adequação das medições às normas técnicas em vigor e possibilitam efetuar uma análise visando identificar quais fatores contribuem mais para a incerteza final, bem como, propor meios para mitigar seus efeitos.

O (ISO TAG 4WG 3, 2008) conceitua três tipos de incerteza: incerteza-padrão, incerteza-padrão combinada e a incerteza expandida. A primeira é obtida através da análise individual de cada variável de entrada considerada, através de uma avaliação do Tipo A ou do Tipo B. 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 desejado.

Para aplicação da metodologia proposta pelo (ISO TAG 4WG 3, 2008) deve-se primeiramente identificar todas as possíveis variáveis que influenciam o resultado de medição. A quantidade e o tipo de grandezas de influência varia de acordo com o sistema de medição, o tipo de mensurando analisado e o nível de exatidão requerido. Em seguida coletam-se todas as informações disponíveis sobre as mesmas e escolhe-se que tipo de avaliação (A ou B) deve ser utilizado para determinar a incerteza-padrão.

2.3.1. Avaliação da incerteza-padrão tipo A e B

O propósito da classificação em Tipo A e Tipo B é apenas o de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes de incerteza, ambos são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios-padrão.

Uma incerteza-padrão do Tipo A nasce a partir de uma função densidade de probabilidade, derivada de uma distribuição de frequência observada; enquanto que uma incerteza-padrão do Tipo B é gerada de uma função densidade de probabilidade assumida como conveniente e adequada com base no grau de credibilidade de que um evento irá ocorrer (frequentemente chamado probabilidade subjetiva). Ambos os enfoques empregam interpretações reconhecidas de probabilidade.

A incerteza-padrão do Tipo A é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal, Fig. 2.18, ou outra

qualquer como a t-Student. As indicações observadas em um instrumento de medição constitui um exemplo de variável cuja incerteza é classificada como do tipo A, apresentando distribuição normal ou t-Student e n-1 graus de liberdade podendo ser calculada utilizando-se a Eq. (2.7).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.7)$$

Em que “s” é o desvio-padrão experimental e “n” é o número de elementos da amostra.

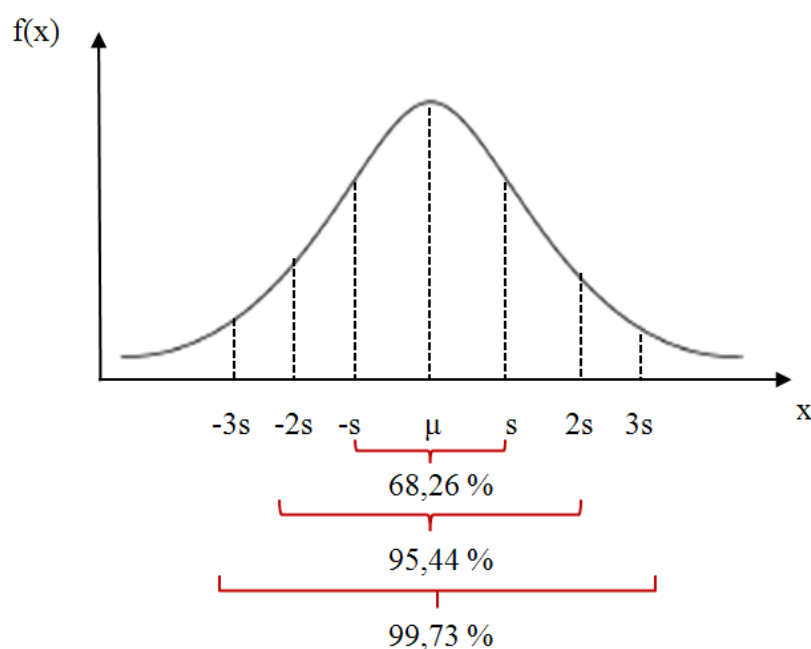


Figura 2.18 - Distribuição normal

Já incerteza-padrão do Tipo B é obtida por outros meios, tais como as considerações de manuais, especificações de fabricantes, certificados de calibração ou a partir de experiências anteriores. Dependendo da qualidade e quantidade de informação disponível, ela assume uma ou outra distribuição.

Para muitos casos é possível encontrar declarado que a incerteza citada define um intervalo tendo um nível da confiança de 90, 95 ou 99 %. Quando não for especificada uma distribuição diferente, pode ser utilizada a distribuição normal para calcular a incerteza

padrão. Para tanto basta dividir a incerteza declarada pelo fator apropriado conforme Eq. (2.8).

$$u(x) = \frac{\text{Incerteza declarada}}{\text{Fator}} \quad (2.8)$$

Em outros casos, é possível estimar apenas os limites superiores e inferiores para X_i e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo (a^-, a^+) é um e a probabilidade para que o valor X_i esteja fora desse intervalo é zero. Para tais situações deve ser utilizada a distribuição retangular ou uniforme, Fig. 2.19.

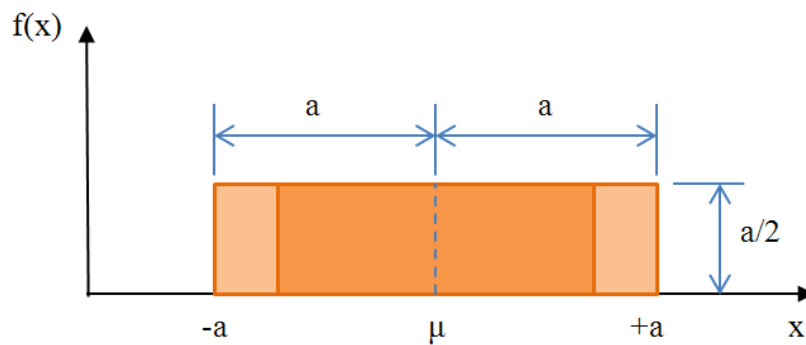


Figura 2.19 - Distribuição retangular (ISO TAG 4WG 3, 2008)

Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer ponto do intervalo. Ainda X_i pode assumir infinitos valores e conseqüentemente o seu grau de liberdade é infinito (LINK, 1997). Considerando a diferença entre os limites, $a^+ - a^-$, designada por $2a$, calcula-se a variância estimada a partir da Eq. (2.9):

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

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

Espera-se que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio, assim faz se necessário o uso de uma distribuição trapezoidal simétrica, Fig. 2.20, com uma base de largura $a^+ - a^- = 2a$ e topo igual a $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$.

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

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

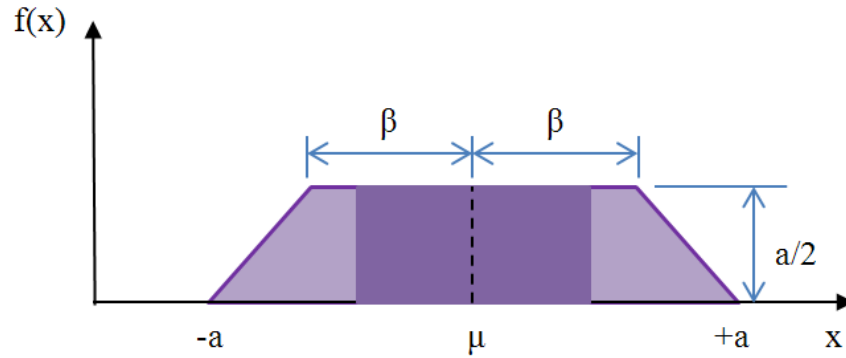


Figura 2.20 - Distribuição trapezoidal (ISO TAG 4WG 3, 2008)

Havendo mais conhecimentos sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, a distribuição de probabilidade assume a forma triangular, Fig. 2.21, com infinitos graus de liberdade, que pode evoluir para uma normal.

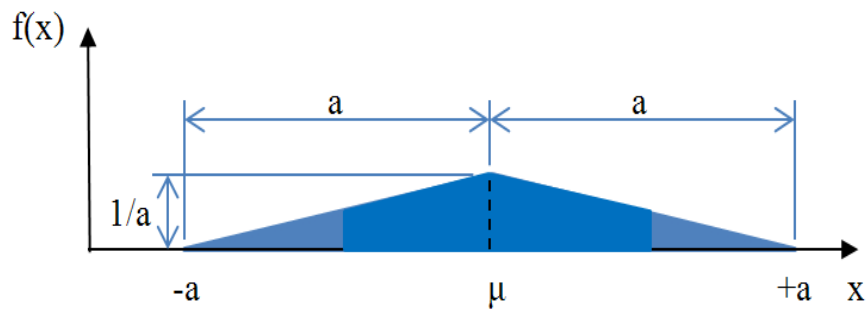


Figura 2.21 - Distribuição triangular (ISO TAG 4WG 3, 2008)

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

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

2.3.2. Incerteza-padrão combinada

Quando todas as grandezas das quais o resultado de uma medição depende forem variadas, sua incerteza poderá ser calculada por meios estatísticos. Entretanto, uma vez que isso é raramente possível na prática, devido a tempo e recursos limitados, a incerteza de um resultado de medição é geralmente avaliada utilizando-se um modelo matemático da medição e a lei de propagação de incertezas. Assim, uma medição pode ser modelada matematicamente até o grau imposto pela exatidão requerida na medição.

Para o cálculo da incerteza padrão combinada $u_c(y)$, há a necessidade desta modelagem matemática que relaciona todas as variáveis de influência do processo de medição, sendo único para cada tipo de grandeza mensurada. Essa função é dada pela Eq. (2.12).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.12)$$

A partir desta Eq. (2.12) obtém-se uma estimativa do mensurando Y , designada como y , tendo como base um conjunto de estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N para os valores das N grandezas X_1, X_2, \dots, X_N . A incerteza padrão combinada, designada por $u_c(y)$, é obtida pela Eq. (2.13).

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

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

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

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

Os termos de derivadas parciais da função em relação a cada variável de entrada indicam os coeficientes de sensibilidade. A magnitude desses coeficientes representa a contribuição de cada fonte de incerteza no valor da incerteza total.

O segundo termo da Eq. (2.13) só irá existir quando houver uma correlação entre as grandezas de entrada x_i e x_j , ou seja, quando $r(x_i, x_j) \neq 0$.

Tal correlação pode ser determinada através de um diagrama de dispersão elaborado a partir de pares ordenados (x, y), onde x é o valor observado de uma variável e y é o seu correspondente da outra variável, podendo apresentar uma correlação positiva, negativa ou não apresentarem correlação.

Ainda, é possível quantificar o grau de correlação entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação linear de Pearson dado pela Eq. (2.15) é uma das possibilidades de quantificação. Este coeficiente de Pearson mede o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. Varia entre o intervalo (-1 e +1) e assume o valor 0 (zero), meio do intervalo, quando não há relação linear; o valor +1 e -1 indica uma relação linear perfeita positiva e negativa, significando respectivamente uma perfeita proporcionalidade direta e indireta entre as variáveis. Quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte é a correlação ou linearidade entre as duas variáveis.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (2.15)$$

2.3.3. Avaliação da incerteza expandida

A incerteza expandida, U, é obtida, multiplicando-se a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k.

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

O fator de abrangência k presente na Eq. (2.16) é escolhido em função do nível de confiança especificado para o intervalo, permanecendo, em geral entre 2 e 3 para uma distribuição normal de probabilidade. O fator de abrangência assume 2 e 3, respectivamente, para um intervalo com um nível de confiança de 95,45 % e 99,73 %.

Quando o número de leituras for reduzido ($n \leq 30$), caracterizando uma amostra pequena, essa aproximação para o fator de abrangência não é estatisticamente adequada. Neste caso, deve ser utilizado o teorema do valor central junto com a tabela t-student para fornecer um valor para k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição.

O cálculo do grau de liberdade efetivo é baseado na equação de Welch-Satterwaite, conforme expresso na Eq. (2.17).

$$v_{\text{efetivo}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(x)}{v_i}} \quad (2.17)$$

O resultado de medição, levando-se em conta a incerteza padrão combinada é dado por $\bar{y} \pm u_c$ e, em relação à incerteza expandida, é expresso por $\bar{y} \pm U$, em que \bar{y} é a estimativa de Y , especificadamente, seu valor médio.

2.3.4 - Limitações de aplicação do ISO TAG 4WG 3 (2008)

A metodologia proposta no ISO TAG 4WG 3 (2008) apresenta algumas limitações de aplicações tais como: linearização do modelo; suposição de uma distribuição normal para o mensurando e cálculo dos graus de liberdade efetivos da incerteza padrão combinada:

- Linearização do modelo

Para o cálculo da incerteza padrão combinada através da propagação das incertezas é utilizado à expansão da série de Taylor até os termos de primeira ordem, entretanto em alguns casos, esta aproximação linear pode requerer termos de mais alta ordem.

- Suposição de uma distribuição normal para o mensurando

Na análise da estimativa da incerteza expandida é pratica comum se considerar a distribuição do resultado como sendo normal. A incerteza expandida U é estimada como sendo o produto do fator de abrangência k pela incerteza padrão combinada $u_c(y)$, sendo assemelhada à variável normal (*z-score*). Assim, é muito comum a apresentação da declaração de incertezas obtidas utilizando-se um fator de abrangência $k=2$, o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

- Cálculo dos graus de liberdade efetivos

Segundo Cox e Harris (2003), o cálculo do número dos graus de liberdade efetivos utilizando a equação de *Welch-Satterthwaite* é ainda um problema insolúvel, porque as incertezas tipo B geralmente contribuem com um infinito número de graus de liberdade.

2.4. Método de Monte Carlo

O método proposto no ISO TAG 4/WG 3 (2008) contempla modelos explícitos, onde apenas uma estimativa de saída, de variáveis reais, é formulada. Outros modelos menos frequentes, como os de múltiplas saídas ou de variáveis complexas não são detalhados exaustivamente por ele.

Portanto a aplicação do método de propagação de incertezas torna-se limitada demais para garantir resultados confiáveis em muitas situações reais. Na intenção de amenizar esta limitação foi publicado em 2008 pelo INMETRO um documento com o título “A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo”.

O método de Monte Carlos (MMC) abordado utiliza simulações computacionais, onde as distribuições de probabilidade das variáveis de entrada são propagadas. Os dados de entrada para aplicação do MMC são semelhantes a aqueles usados na abordagem do ISO TAG 4/WG 3 (2008), isto é, parte-se de uma modelagem matemática descrevendo o mensurando com variáveis de entrada e de suas informações estatísticas. A diferença fundamental é que as informações estatísticas de entrada usadas no ISO TAG 4/WG 3 (2008) são basicamente a média, o desvio padrão e os graus de liberdade de cada distribuição. Já no MMC as próprias Funções Densidade de Probabilidade (FDP) das distribuições de entrada é que são utilizadas, proporcionando informações mais completas sobre tais distribuições.

Para a aplicação do método há a necessidade de utilizar um gerador de números pseudoaleatórios e efetuar um número M de iterações grande o suficiente para promover resultados adequados. Portanto a qualidade dos resultados desejada ao aplicar o MMC depende das disponibilidades de *hardware* e de tempo, pois o aumento de M gera um aumento nos requisitos sobre o *hardware* usado na simulação e no tempo necessário para se obter uma resposta.

Pode-se acrescentar que o erro amostral da simulação não é a única fonte de desvios potenciais na análise de incerteza pelo MMC, modelos matemáticos pouco representativos e grandezas de influência mal caracterizadas podem gerar desvios bem maiores e mais difíceis de serem detectados.

O método de Monte Carlo é um procedimento numérico para a solução de problemas matemáticos por meio da simulação de variáveis aleatórias.

A sua criação data, aproximadamente, de 1944 com os norte-americanos J. Von Neumann e S. Ulam, e o desenvolvimento do computador. Entretanto só em 1949 apareceu o

primeiro artigo sobre o assunto, intitulado “The Monte Carlo method” (SOBOL, 1976). Os primeiros trabalhos sobre avaliação da incerteza de medição usando o Método de Monte Carlo foram publicados na década dos anos 90 (VALDÉS, 2006).

O método utiliza um algoritmo que apresenta uma estrutura simples e um programa para realização de uma prova aleatória, depois esta prova é repetida M vezes de modo que cada experimento seja independente dos outros. Por tal motivo, o método de Monte Carlo é conhecido também como método de provas estatísticas.

O método de Monte Carlo para a estimativa de incerteza de medição, como no ISO TAG 4/WG 3 (2008), pode ser resumido nos seguintes etapas principais:

- Definição do mensurando;
- Elaboração do diagrama causa-efeito;
- Estimativas das incertezas das fontes de entrada;
- Identificação das funções densidade de probabilidade, relativas as fonte de entrada;
- Seleção do número de iterações de Monte Carlo;
- Escolha da função densidade de probabilidade $p(x_i)$;
- Estimativa da incerteza expandida.

As primeiras três etapas – definição do mensurando, elaboração do diagrama causa-efeito e estimativas das incertezas das fontes de entrada descritas para o método de Monte Carlo são idênticas àquelas citadas na metodologia de cálculo do ISO TAG 4/WG 3 (2008).

A quarta etapa da metodologia de Monte Carlo é a identificação das funções densidade de probabilidades referentes a cada fonte de entrada. Cada função densidade de probabilidade tem um intervalo no qual seu limite inferior é definido pelo valor mais provável da fonte subtraído da sua respectiva incerteza estimada, e o seu limite superior é calculado pelo valor mais provável da mesma fonte de entrada adicionado da sua estimativa da incerteza.

Definidos as funções densidade de probabilidade e os seus respectivos intervalos para cada fonte de incerteza de medição, escolhe-se o número de iterações desejadas, que representam a quantidade de números que serão gerados no intervalo de cada função densidade de probabilidade. 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 desejado, são obtidos tantos valores do mensurando quanto a quantidade de números que estavam contidos nos intervalos das funções densidade de probabilidade de cada

fonte. Deste modo é possível executar os cálculos da média (μ) e do desvio padrão (σ) de todos os valores obtidos para o mensurando.

Se a distribuição final de todos os valores calculados do mensurando é normal (z), o seu valor de simetria *skewness* é próximo de zero. Deste modo, a partir do conceito de distribuição normal padronizada e para uma probabilidade de abrangência desejada, é possível definir, então, o limite inferior e o limite superior da função densidade de probabilidade dos valores do mensurando, já que são conhecidos os valores da média e do desvio-padrão.

Por exemplo, os valores de z referentes aos limites superior e inferior do intervalo da função densidade do mensurando, para a probabilidade de abrangência de 95,45%, são definidos pelas Eqs (2.18) e (2.19), respectivamente:

$$-2 = \frac{Li - \mu}{\sigma} \quad (2.18)$$

$$+2 = \frac{Ls - \mu}{\sigma} \quad (2.19)$$

onde:

(-2 e +2) são os valores respectivos de z correspondentes aos limites inferior e superior do intervalo da função densidade de probabilidade do mensurando, cuja probabilidade de abrangência é 95,45%;

(L_i) é o limite inferior do intervalo;

(L_s) é o limite superior do intervalo.

Desta forma, a incerteza para uma probabilidade de abrangência de 95,45% da incerteza expandida é definida pela semi-amplitude do intervalo, conforme Eq. (2.20).

$$U (p= 95,45\%; k= 2) = \frac{Ls - Li}{2} \quad (2.20)$$

2.4.1- Determinação do número de iterações

Um valor M (número de iterações do Método de Monte Carlo) deve ser selecionado a priori, não havendo controle direto sobre a qualidade do resultado numérico fornecido pelo método. A quantidade de dados necessária para fornecer resultados consistentes depende do formato da FDP da variável de saída e da probabilidade de abrangência requerida. Além disso, os cálculos realizados são estocásticos por natureza, sendo baseados em uma

amostragem aleatória. Como não há nenhuma garantia que este ou qualquer número pré-determinado será suficiente, um procedimento para a escolha de M deve ser utilizado.

2.4.2 - Avaliação do modelo

O modelo matemático proposto é avaliado para cada um dos valores de M retirados das FDP das X_i variáveis de entrada. Especificamente, deve-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. (2.21):

$$y_r = f(x_r), \quad r = 1, \dots, M. \quad (2.21)$$

2.4.3 - Representação discreta da distribuição da função para a variável de saída

A representação discreta da distribuição da função da variável de saída Y (mensurando, que neste trabalho são os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_z e R_t) pode ser obtida de acordo com o procedimento a seguir:

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

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

2.4.4 - Estimativa da variável de saída e da incerteza padrão associada

A média da variável de saída é dada pela Eq. (2.22), enquanto que o desvio padrão, $u(\tilde{y})$ é determinado a partir de (2.23).

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

$$u(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \bar{y})^2} \quad (2.23)$$

A média aritmética dos M valores do mensurando obtidos durante a simulação de Monte Carlo é considerada como uma estimativa *y de Y* e o desvio padrão representa a incerteza padrão $u(y)$ associada a y .

2.4.5 - Intervalo de abrangência para a variável de saída

O intervalo de abrangência para Y pode ser determinado a partir da representação discreta da FDP. A seguir deve-se determinar o valor de q pela Eq. (2.24), onde p representa a probabilidade e M o número de iterações.

$$q = pM \quad (2.24)$$

A Equação (2.24) é válida apenas quando q for um número inteiro. Caso contrário, q é determinado pela Eq. (2.25).

$$q = pM + \frac{1}{2} \quad (2.25)$$

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

Existem vários *softwares* que trabalham com a Simulação do método de Monte Carlo, dentre eles: @RISK, da Palidase, o Crystal Ball 2000, da Decisioneering, o Mathematica e planilhas eletrônicas como a Microsoft Excel para a execução dos cálculos. Alguns autores como: Piratelli e Di Giacomo (2003) e Junqueira e Pamplona (2002), Costa (2012) e Leal (2013) utilizaram o Excel de forma satisfatória para avaliação da incerteza de medição de mensurandos diversos. Valdés *et al.*, (2009) utilizaram o “Simulación 4.0”, compatível com o Excel 97 e superiores, considerada uma ferramenta de simulação flexível e de fácil uso.

2.5 Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos baseia-se em princípios estatísticos, possibilitando extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de

experimentos. A atividade estatística mais importante é o planejamento dos experimentos por meio dos quais dados devem ser obtidos. Quando isso não é feito da forma apropriada, o resultado muitas vezes é uma montanha de números estéreis, da qual estatístico algum conseguiria extrair quaisquer conclusões (NETO et al. 2001).

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

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

2.5.1 - Princípios básicos do planejamento de experimentos

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

- Réplicas

As réplicas são repetições do experimento feitas sob as mesmas condições experimentais.

- Aleatorização

A expressão aleatorização se refere ao fato de que tanto a alocação do material experimental às diversas condições de experimentação, quanto a ordem segundo a qual os ensaios individuais do experimento serão realizados, são determinados ao acaso. A aleatorização torna possível a aplicação dos métodos estatísticos para a análise dos dados.

- Formação de Blocos

Em muitas situações experimentais é necessário planejar o experimento de forma que a variabilidade resultante de fatores externos conhecidos, sobre os quais não existe interesse, possa ser sistematicamente controlada e avaliada.

Se estes fatores externos não forem controlados, mesmo usando a aleatorização, o erro experimental irá refletir tanto o erro aleatório inerente ao experimento, quanto a variabilidade existente em função desses fatores.

Nesta situação, deve-se formar blocos para os vários fatores externos de influência, e realizar repetições completas do experimento em cada bloco, dessa forma em cada bloco poderão ser observadas as diferenças existentes devido ao fator de interesse, minimizando assim o efeito dos fatores perturbadores no resultado final do experimento. Aqui cada bloco corresponde a um corpo de prova. O objetivo principal do experimento é avaliar com maior eficiência os efeitos dos fatores de interesse, no caso as variáveis frequência e aceleração.

2.5.2 - Roteiro para a realização de um bom experimento

Para usar a abordagem estatística no planejamento e na análise de um experimento é necessário que as pessoas envolvidas na experimentação tenham, antecipadamente, uma idéia clara do que será estudado e da forma como os dados serão coletados. Também é recomendado que se tenha uma idéia qualitativa de como os dados serão analisados. Um roteiro para a realização de um bom experimento é apresentado a seguir:

- a) Reconhecimento e relato do problema;
- b) Escolha dos fatores e dos níveis;
- c) Escolha da variável resposta;
- d) Escolha do planejamento experimental;
- e) Realização do experimento;
- f) Análise dos dados;
- g) Conclusões e recomendações.

2.5.3 - Análise de variância

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

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

A ANOVA utiliza basicamente duas ferramentas, a saber: o teste de Hipótese e a distribuição de probabilidade Fisher-F com nível de significância determinado, geralmente $\alpha = 5\%$.

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

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

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

Por se tratar de um teste bastante difundido, inúmeros *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas possuem o procedimento para ser aplicado automaticamente. Neste trabalho utilizou-se o software Statistic 7.

Para um conjunto de dados experimentais (s^2) a expressão matemática para o cálculo da variância abrange a razão entre a soma dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média (\bar{y}) de todos os dados (SQT) e o número total de graus de liberdade (GLT), conforme mostram as Eqs. 2.26 e 2.27.

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.26)$$

$$s^2 = \frac{SQT}{GLT} \quad (2.27)$$

É possível desmembrar a variância s^2 a partir da soma de quadrados total (SQT) adicionando-se e subtraindo-se a média amostral da Eq. (2.26), pode-se demonstrar que as duas somas de quadrados resultam como nas Eqs 2.28 e 2.29 as quais representam os desvios dentro e entre as amostras.

$$SQ_{dentro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.28)$$

$$SQ_{entre} = \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2 \quad (2.29)$$

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

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

O resíduo ou erro experimental é o quadrado médio que representa a variação dentro das amostras.

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

Esta relação ou teste F é a razão entre os quadrados médios, dada pela Eq. (2.30). Este valor de F é comparado com os valores de F tabelado em função do número de graus de liberdade das variâncias e do nível de confiança desejado (usualmente probabilidade de 95%).

$$F_{1,2} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (2.30)$$

O valor de F tabelado é proveniente de uma distribuição de probabilidade da razão entre variâncias de duas amostras, extraídas aleatoriamente de uma mesma população com distribuição normal de variância σ^2 . Os resultados da análise de variância são apresentados através de um quadro, Tab. 2.6. Para que os resultados encontrados sejam validos, é necessário que os dados apresentem distribuição normal e que as variâncias dentro das amostras sejam aproximadamente iguais.

Tabela 2.6 – Quadro de ANOVA

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

Uma vez que é possível ajustar um modelo matemático por análise de regressão, estes pré-requisitos podem ser verificados pela análise gráfica dos resíduos. As conclusões extraídas em testes de hipótese, como o teste F das variâncias amostrais, estão baseadas em curvas de distribuição de probabilidade. Dois erros podem ser cometidos: erro tipo I e erro tipo II. O tipo I é cometido quando a hipótese H_0 é verdadeira e o teste permite sua rejeição. A probabilidade de cometer este erro pode ser controlada pela seleção da confiança estatística desejada, na realização do teste de hipótese. Assim, se a confiança escolhida for 95% a probabilidade de rejeição de uma hipótese verdadeira é de 5%. O erro tipo II é cometido quando a hipótese H_0 é falsa e o teste permite sua aceitação. A probabilidade de se cometer este erro é designada por β e depende do tamanho da amostra, do desvio padrão amostral e do tamanho da diferença entre médias consideradas para rejeitar a hipótese de igualdade entre médias.

As componentes de variância podem ser determinadas através da análise de variância, desde que a variável (ou variáveis) seja aleatória. A análise de variância pode ser utilizada para verificar o efeito de uma serie de variáveis aleatórias, atuando ao mesmo tempo em um instrumento de medição, e estimar as componentes de variância de cada variável. A análise de variância permite ainda, concluir no grau de confiança estipulado, se existe ou não diferenças entre duas ou mais médias amostrais (BOX, HUNTER, HUNTER, 1978; WERKEMA, *et al.*, 1996 e MONTGOMERY, 2001).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para o estudo e identificação do efeito da vibração mecânica nos resultados da medição de rugosidade, especificamente na medição dos parâmetros: Ra (Desvio Aritmético Médio do Perfil); Rq (Desvio Aritmético Quadrático do Perfil), Rz (Altura Máxima do Perfil) e Rt (Altura Total do Perfil). Estes parâmetros de rugosidade foram escolhidos por serem parâmetros de amplitude, espera-se que os valores numéricos destes sejam influenciados pela vibração.

Cabe destacar que as grandezas rugosidade e vibração foram medidas simultaneamente. Entretanto para facilitar o entendimento são apresentadas em separado. Desta forma, o presente capítulo foi dividido em cinco etapas, descritas a seguir:

1. Medição da rugosidade na condição $C0$ (sem vibração) com contato por meio de um rugosímetro eletromecânico e sem contato usando um interferômetro com luz branca;
2. Pré-testes: medição da rugosidade de uma amostra de alumínio de forma simultânea à medição da vibração na faixa de frequência de 50 Hz a 150 Hz e diferentes valores de aceleração.
3. Planejamento fatorial completo: medição da rugosidade (Ra , Rq , Rz e Rt) de três amostras considerando duas variáveis independentes (aceleração e frequência) em três níveis cada;
4. Análise estatística (ANOVA);
5. Avaliação da incerteza de medição.

3.1. Medição da rugosidade na condição *C0* (sem vibração)

A rugosidade de três amostras (Fig. 3.1a) foi avaliada na condição *C0* (sem vibração) por meio de um rugosímetro eletromecânico. Esta condição se caracteriza por: temperatura ambiente de $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$; ar condicionado desligado; isolamento da vibração transmitida pelo solo, posicionando o sistema de medição de rugosidade sobre uma mesa inercial.

3.1.1. Medição com contato da rugosidade

A rugosidade das três amostras (Fig. 3.1a) foi avaliada por meio de um rugosímetro digital portátil, modelo TIME TR200 da Homis (Fig. 3.1b). A amostra 1 foi fabricada por meio do aplainamento, enquanto que as amostras 2 e 3 foram obtidas por torneamento.

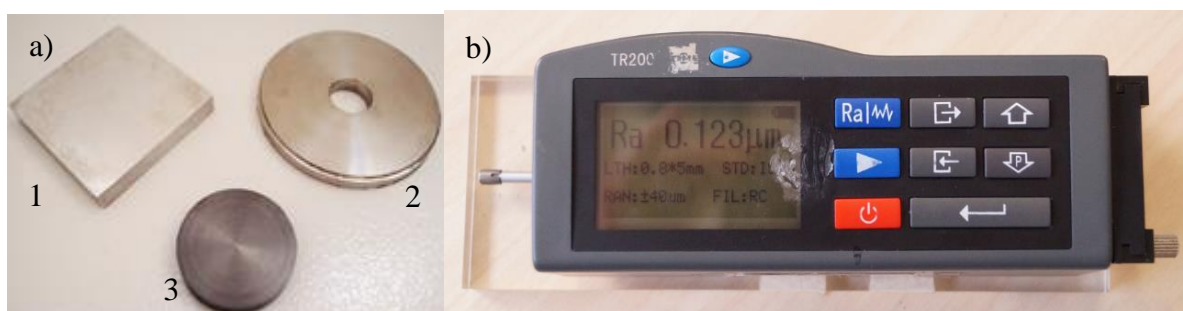


Figura 3.1 – (a) amostras avaliadas, 1: amostra de alumínio, 2: amostra de aço inox, 3: amostra de aço carbono, (b) Rugosímetro portátil modelo TIME TR200 da Homis

O rugosímetro TR200 da Homis possui um sensor indutivo com apalpador de ponta em diamante com raio igual a $2\ \mu\text{m}$, o que caracteriza esta medição como medição com contato. A faixa nominal do equipamento é de $160\ \mu\text{m}$ e resolução de $0,001\ \mu\text{m}$. Segundo o Certificado de calibração CCA-010 (2012) (ANEXO, 1), emitido pelo laboratório de metrologia da FEMEC-UFU a incerteza expandida associada à calibração deste rugosímetro é de $0,060\ \mu\text{m}$ para k igual a 2,57 e 95 % de abrangência.

Para a aquisição dos dados correspondente à rugosidade das amostras foi utilizado um programa computacional da TimeSurf For TR200 V1.4 fornecido pelo fabricante do rugosímetro. A Figura 3.2 mostra a tela principal do programa.

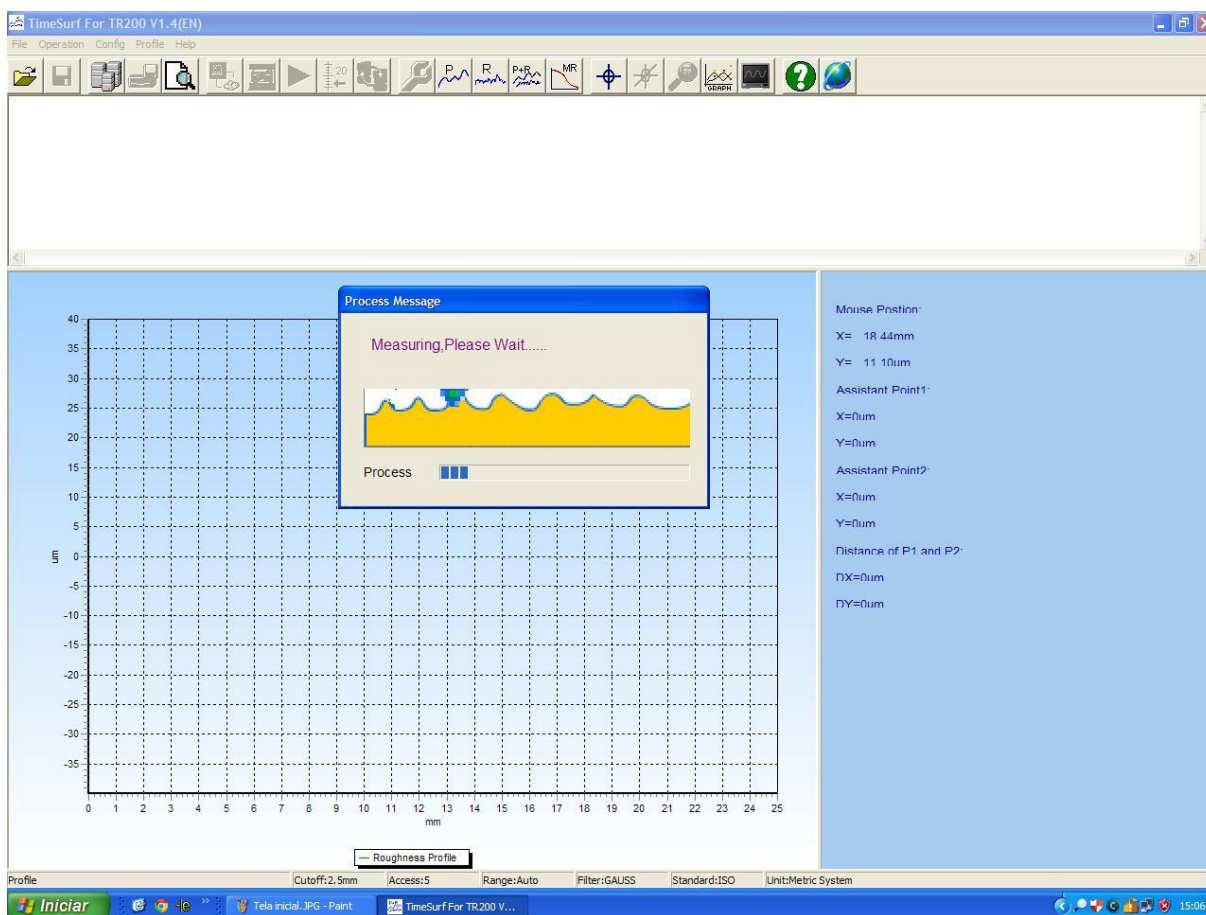


Figura 3.2 – Tela principal do programa computacional TimeSurf For TR200 V1.4

O programa solicita informações importantes de entrada como: valor do *cut-off*; tipo de filtro a ser utilizado; sistema de unidades; número de comprimentos de amostragem e a norma técnica de referência (Fig. 3.3). Algumas características deste programa o tornam muito interessante na avaliação da rugosidade, pois o mesmo além de fornecer diversos parâmetros como: R_a , R_q , R_z , R_t , R_p , R_v , RSm e RSk mostram o perfil de rugosidade com e sem o uso de filtros e a curva de Abbott-Firestone.

Assim, com os valores destes parâmetros, a rugosidade das amostras foi analisada para as diversas condições investigadas.

O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi escolhido de acordo com a ABNT NBR ISO 4288 (2008), sendo de 2,5 mm para as amostras 1 e 3 e de 0,8 mm para a amostra 2. Em todos os casos foi aplicado o filtro Gaussiano para remover as ondulações presentes na superfície da amostra. Somente para a amostra de aço carbono foi aplicado o filtro de Abbott Firestone para retirar a grande quantidade de poros provocados pela oxidação da amostra, que foram detectados durante a medição. Para a correção de defeitos presentes nas topografias das

amostras de alumínio e de aço inox foi aplicado um operador disponível no programa computacional do interferômetro, o *Retouch Surface*. Este calcula a ordenada média dos pontos de uma área selecionada a priori e substitui o defeito pelo valor da ordenada média.

Esta correção foi feita de forma individual para cada defeito. Sendo que cada parâmetro de rugosidade foi medido cinco vezes para cada condição dos experimentos.

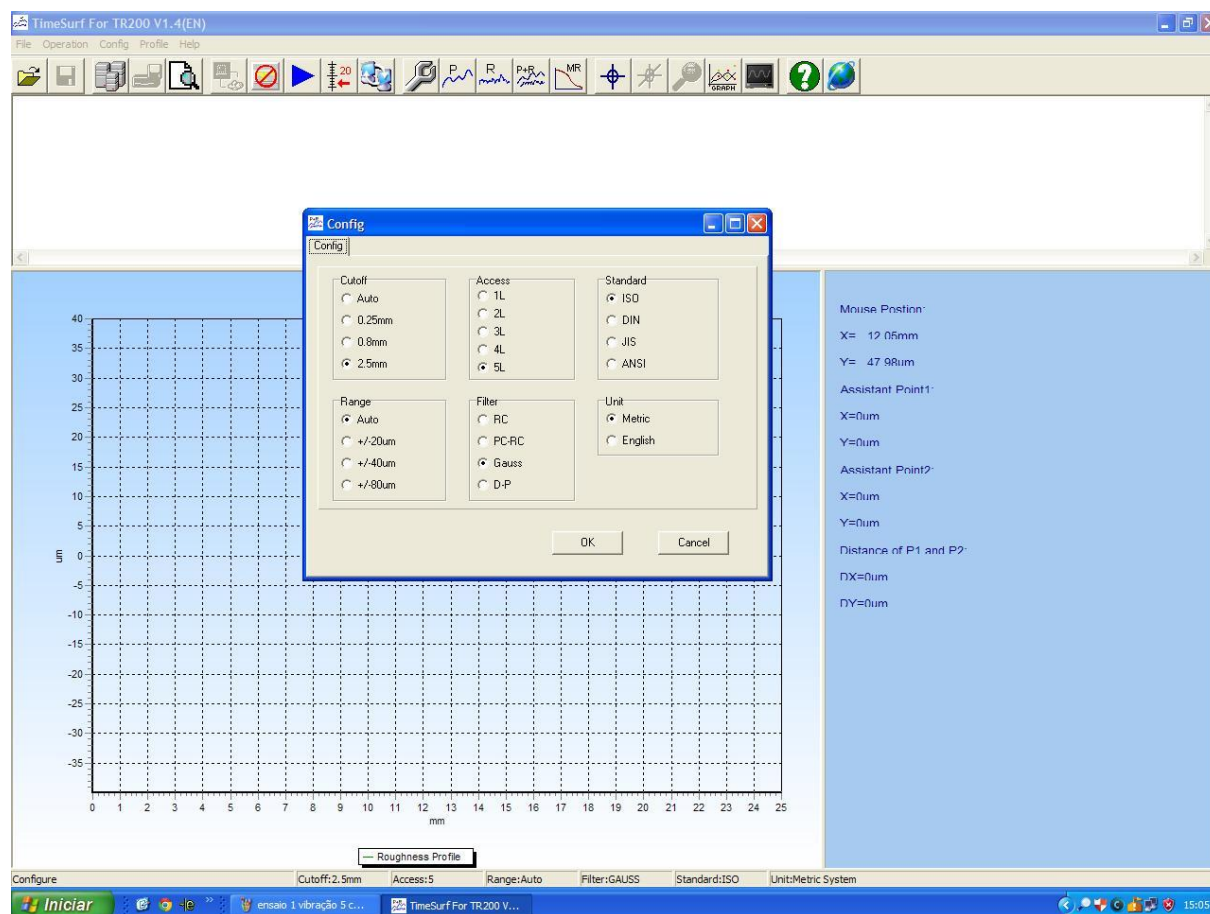


Figura 3.3 – Tela inicial do programa computacional TimeSurf For TR200 V1.4

Para evitar o efeito da vibração de fontes externas transmitida pelo solo, o sistema de medição de rugosidade foi posicionado sobre uma mesa inercial, conforme mostra a Fig. 3.4.

Para garantir o adequado posicionamento do rugosímetro e da amostra objeto de medição sobre o excitador foi projetado e fabricado um dispositivo em acrílico (Fig. 3.5). Este dispositivo foi fixado ao excitador por meio de quatro parafusos.

Antes do início da medição, as amostras foram limpas a fim de retirar impurezas que pudessem alterar os valores de rugosidade. Posteriormente efetuou-se uma análise visual das superfícies das amostras, objetivando identificar o formato e a orientação dos sulcos

decorrentes da usinagem. Com a orientação identificada, foi escolhida a direção adequada para apalpamento da superfície durante a medição.

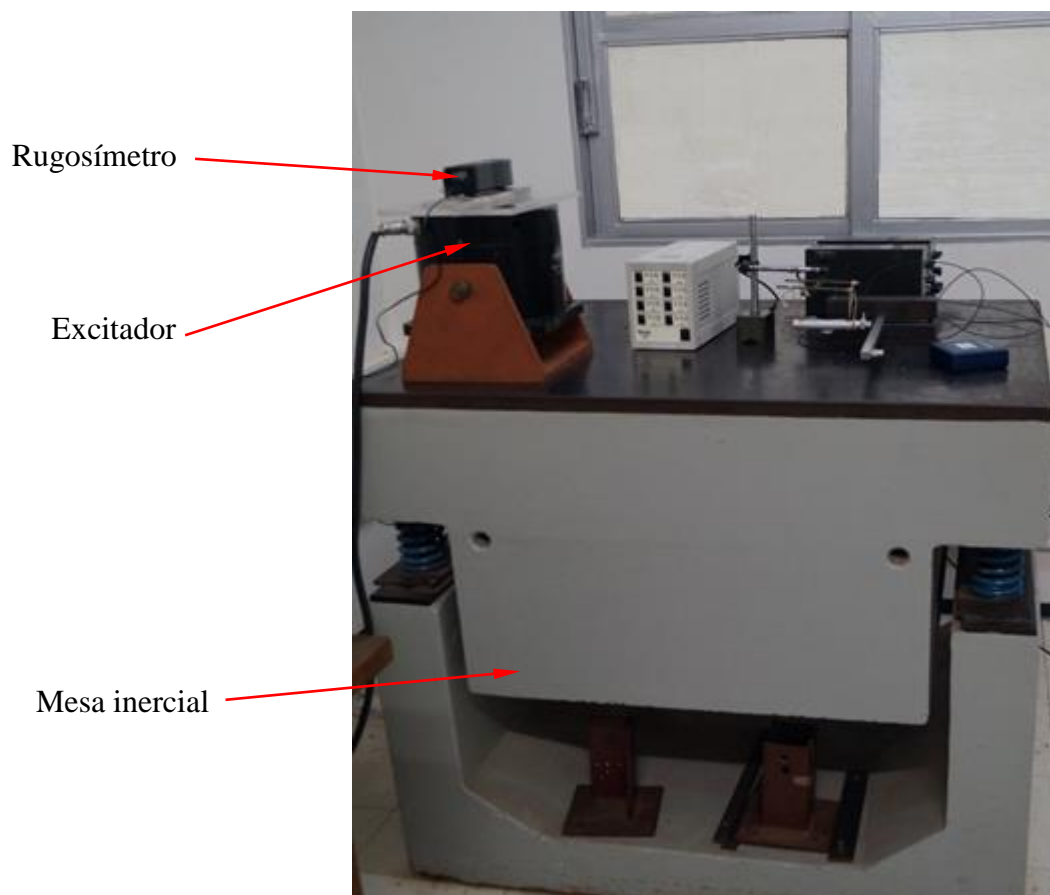


Figura 3.4 - Rugosímetro e excitador posicionados sobre a mesa inercial

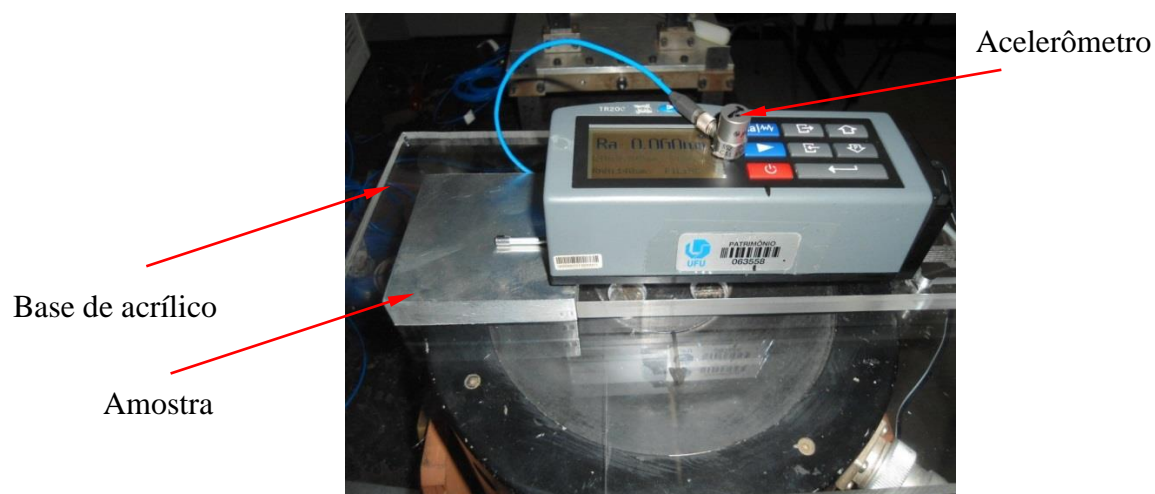


Figura 3.5 – Posicionamento do rugosímetro no dispositivo de acrílico sobre o excitador

Para efeitos de comparação e análise a rugosidade das amostras, também, foi medida utilizando um interferômetro com luz branca, sem contato.

3.1.2. Medição da rugosidade sem contato

A medição sem contato da rugosidade foi efetuada por meio de um interferômetro modelo TALYSURF CLI 2000 fabricado pela Taylor Hobson (Fig. 3.6).

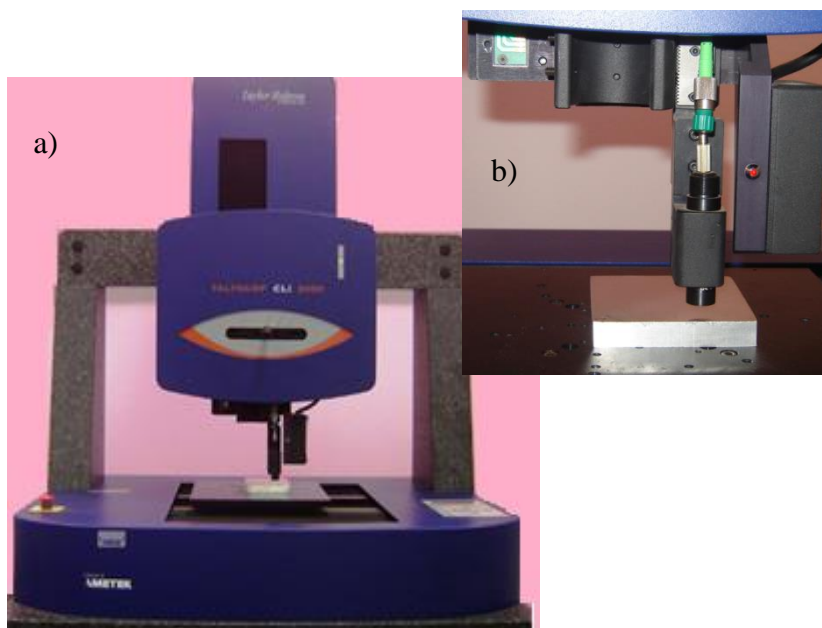


Figura 3.6 - (a) Interferômetro TALYSURF CLI 2000 do Laboratório de Tecnologia de Atrito e Desgaste da UFU, (b) amostra de alumínio durante a medição.

A incerteza expandida associada à calibração do interferômetro obtida por Magalhães (2013) é de 0,016 mm para k igual a 2,16 e 17 graus de liberdade efetivos. A distribuição adotada, neste caso foi a Normal para 95,45% de probabilidade de abrangência.

Durante a medição foi utilizada a luz branca, que permite medições com resolução de 0,01 μm . Para todas as amostras foi avaliada uma área de 1 mm² com espaçamento entre pontos e entre linhas de 2 μm e velocidade de medição de 100 $\mu\text{m/s}$. Nestas condições o tempo de medição foi de 3 horas.

Foram efetuados cinco ciclos de medição para cada amostra avaliada, utilizando o comprimento de amostragem definido anteriormente na medição com contato. Durante o processamento dos dados, na medição sem contato, foram aplicados os mesmos filtros utilizados na medição com contato.

A coleta dos dados foi efetuada com o programa computacional, TALYSURF CLI 2000 (Fig. 3.7) que apresenta uma interface gráfica bastante amigável com o usuário.

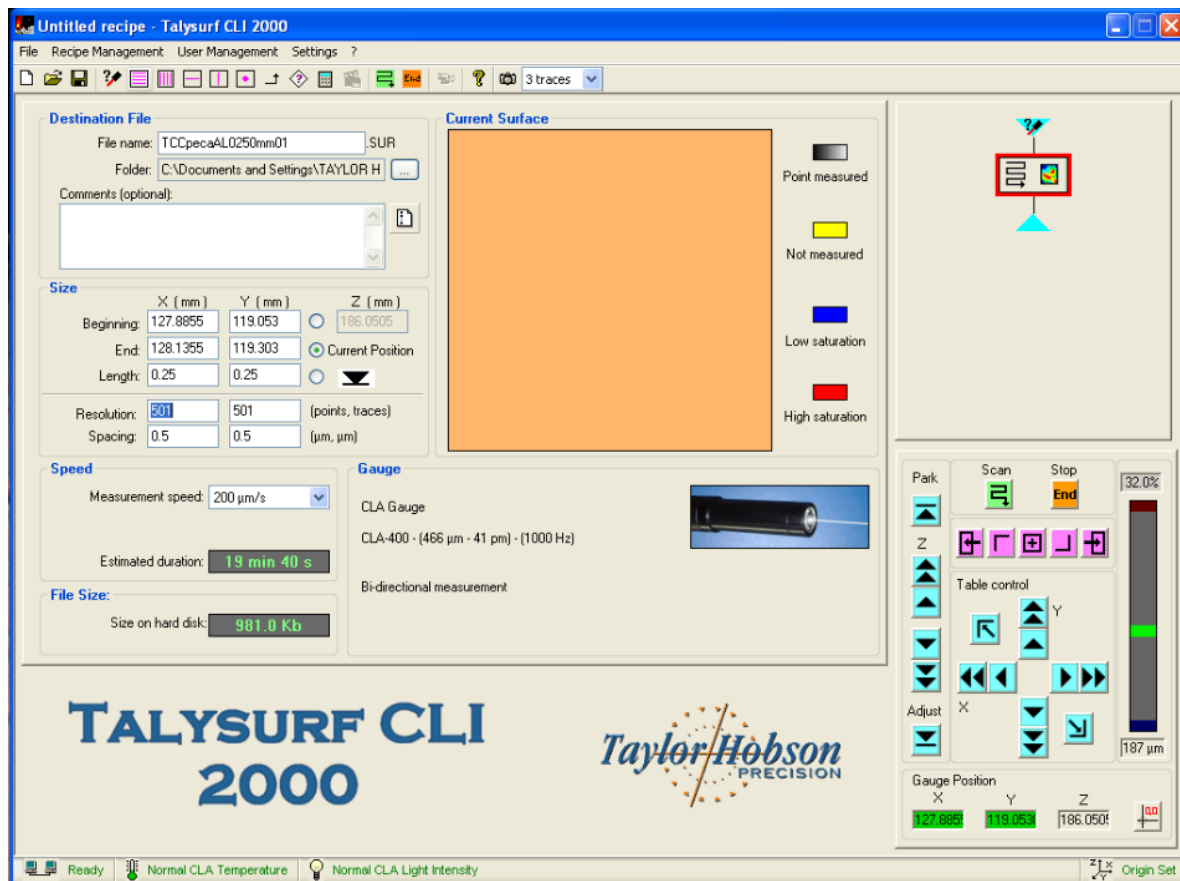


Figura 3.7 – Interface gráfica do programa TALYSURF CLI 2000

As medições foram efetuadas a temperatura ambiente (25 ± 2)°C. Para impedir o efeito da vibração provocada pelo equipamento de condicionamento de ar, este permaneceu desligado durante a medição. Com isto o efeito da vibração proveniente do fluxo de ar também foi eliminado.

Para monitorado da temperatura foi utilizado um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1°C e faixa nominal de (-20 a 60)°C. Este equipamento possui certificado de calibração N. R4996/13, emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação (ANEXO 2). Para a temperatura, a incerteza expandida é de 0,3 °C para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade.

3.2. Pré-testes

Os pré-testes consistiram na medição da rugosidade de uma amostra de alumínio de forma simultânea ao monitoramento da vibração. Os objetivos dos mesmos foram:

- Identificar as frequências em que são observadas variações nos valores dos parâmetros de rugosidade;
- Identificar se a influência da vibração nos valores dos parâmetros é significativa e para tanto foi efetuada uma análise estatística de variância (ANOVA) utilizando versão do *Statistic 7.0*[®];
- Quais parâmetros sofrem variações.

Considerando que as possíveis fontes de vibração que podem influenciar os resultados da medição de rugosidade por contato são os equipamentos mecânicos como motores rotativos, aparelhos de ar condicionado e compressores, mediu-se a vibração gerada quando o aparelho de ar condicionado da sala do laboratório de Sistema Mecânicos LSM estava a plena carga. Como resultado constatou-se que a frequência predominante no funcionamento do ar condicionado se encontrava dentro da faixa de 50 Hz a 150 Hz.

3.2.1. Medição da rugosidade

A rugosidade de uma amostra de alumínio, aplainada, foi avaliada através do rugosímetro portátil, eletro-mecânico, TIME TR200 da Homis conforme especificado no item 3.1.1.

3.2.2. Medição da vibração

Paralelamente à medição da rugosidade foi efetuado o monitoramento da amplitude da vibração. Para tanto foi utilizado um acelerômetro piezelétrico acoplado a um sistema composto por um amplificador de sinais (marca PCB, modelo PCB-482-A-20), um analisador de sinais (SPECTRAL DYNAMICS – SD 380), um amplificador de potência modelo 2712, um excitador, um gerador de sinais modelo 1049 do fabricante Brüel e Kjaer, um computador com um *software* especificamente desenvolvido para aquisição de sinais de aceleração proveniente da vibração. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram o diagrama de bloco e uma imagem do sistema de medição utilizado durante os experimentos.

O acelerômetro piezelétrico possui Certificado de Calibração N. 352C33/97521 emitido pelo Laboratório - PCB Piezotronics Vibration Division

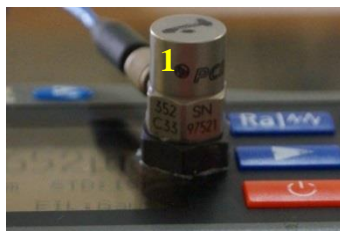
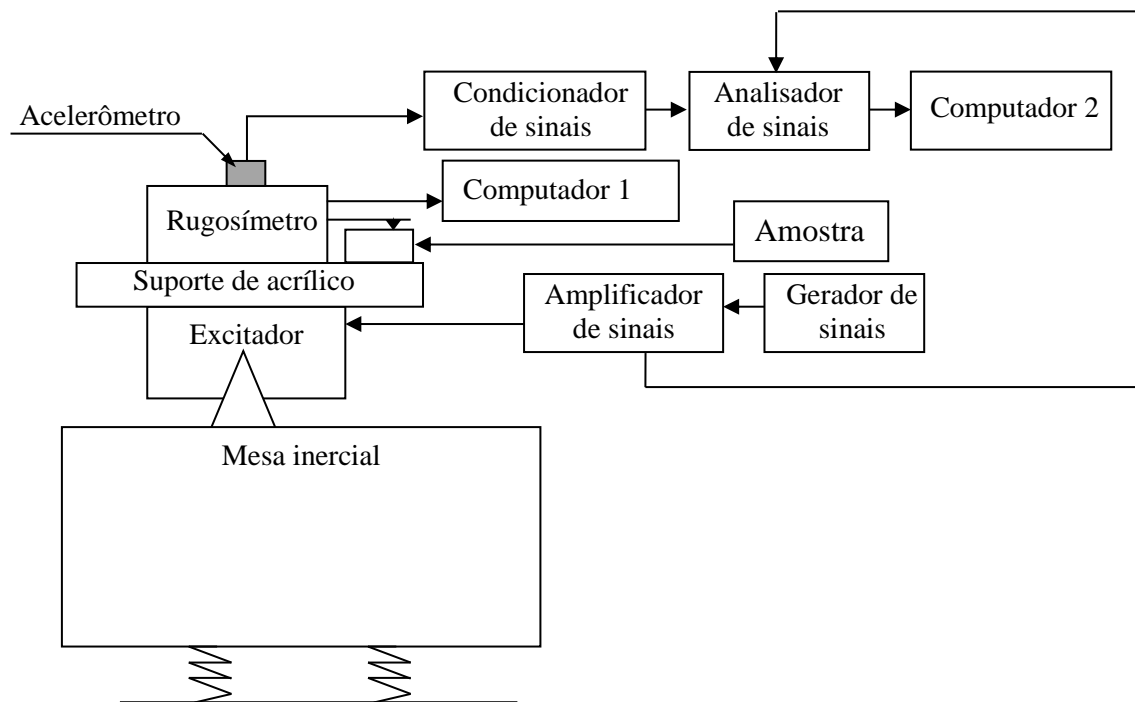


Figura 3.8. Diagrama de bloco do sistema de medição utilizado



Figura 3.9. Equipamentos que compõem o sistema de medição utilizado para monitoramento das vibrações (1) acelerômetro piezelétrico *PCB*, (2) excitador, (3) analisador de sinais, (4) condicionador de sinais, (5) amplificador de sinais, (6) gerador de sinais e (7 e 8) computadores para monitoramento da vibração e coleta da rugosidade, respectivamente.

O acelerômetro foi fixado com cera na superfície do rugosímetro sobre o centro de massa do sistema (rugosímetro, amostra e plataforma de acrílico), a fim de garantir a máxima incidência da vibração. Dentre as principais características deste sensor podem ser citadas: pouca massa; baixa sensibilidade a fatores ambientais; isolado eletricamente com frequência de ressonância alta e facilidade de montagem.

O condicionador de sinais utilizado é, também, da marca PCB, modelo PCB-482-A-20. Por sua vez, o analisador de sinais é da marca *SPECTRAL DYNAMICS* – SD 380 com dois canais.

Os diferentes níveis de vibração foram provocados por meio de um gerador de sinais, do fabricante *Brüel e Kjaer*, modelo 1049 acoplado a um amplificador de potencia, também da *Brüel e Kjaer* modelo 2712, associado a um excitador dinâmico *Brüel e Kjaer* modelo - 4810 de forma a se ter pleno conhecimento e controle das frequências, amplitudes de deslocamento e acelerações da vibração gerada.

Com o intuito de verificar se o nível de vibração variava ao longo da base de acrílico foi monitorada a vibração posicionando o acelerômetro em três locais diferentes, conforme ilustra a Fig. 3.10.

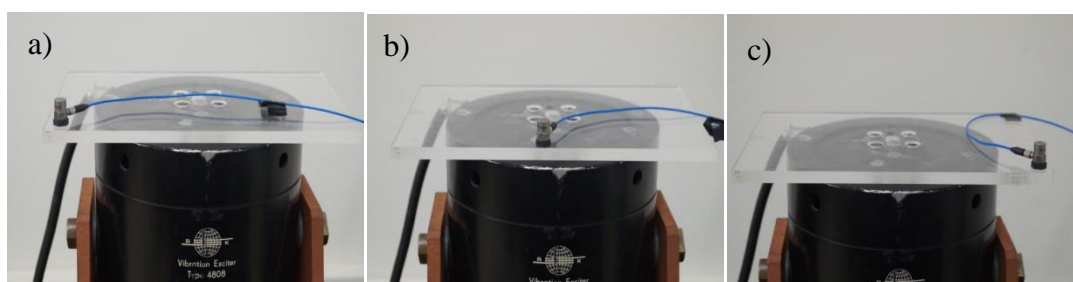


Figura 3.10 – Posicionamento do acelerômetro na base de acrílico

Neste experimento a frequência da vibração induzida pelo gerador de sinais variou na faixa de 50 Hz a 150 Hz (intervalo de abrangência das frequências geradas quando do funcionamento dos prováveis equipamentos mecânicos de influência no experimento). Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas entre os sinais de vibração nas três posições avaliadas. A seguir foram monitoradas as vibrações geradas durante a medição pelo rugosímetro eletromecânico. Observou-se que a frequência da vibração gerada não foi suficiente para analisar a amplitude dos sinais.

A partir dos resultados obtidos nos experimentos anteriores, os ensaios foram realizados aplicando vibração na direção normal ao curso de deslocamento do apalpador do rugosímetro enquanto que o acelerômetro foi fixado na superfície do rugosímetro, na direção vertical do eixo de massa do sistema.

Os valores dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt foram coletados para quatro condições de aceleração, para todas elas a faixa de frequência permaneceu constante variando a aceleração através da amplitude do sinal do gerador de sinais. Neste equipamento foi induzida vibração com valores de aceleração (RMS) de: 0,04 m/s²; 0,08 m/s²; 0,13 m/s² e 0,17 m/s², respectivamente (conforme identificadas nos pré-testes).

3.3. Planejamento dos Experimentos

Antes de iniciar qualquer experimentação, é importante estabelecer o planejamento dos testes. Werkema; Aguiar (1996), Coleman; Montgomery (1993) e Montgomery (1991) ressaltam a importância do domínio do problema por todas as pessoas envolvidas e recomendam que durante os experimentos, o processo deve ser cuidadosamente monitorado, para garantir que tudo seja realizado de acordo com o planejado, pois erros no procedimento experimental muito provavelmente invalidarão os resultados.

Reconhecida a importância do planejamento e execução do experimento, neste trabalho, foram propostas as seguintes etapas para definição do planejamento do experimento.

3.3.1. Definição dos objetivos do experimento

O objetivo principal do experimento foi responder dois questionamentos, são eles:

- a) A vibração interfere no processo de medição da rugosidade utilizando rugosímetro portátil eletromecânico?
- b) Interferindo, é possível identificar para quais valores ou limites (frequência, amplitude) desta vibração afetam nos resultados da medição da rugosidade?

3.3.2. Seleção das variáveis de controle e de resposta

As variáveis independentes investigadas foram: a frequência e a aceleração, ambas em três níveis, a saber, 60 Hz, 80 Hz e 100 Hz para a frequência, com a aceleração de 0,6 m/s², 1,0 m/s² e 1,6 m/s². As variáveis de resposta ou dependentes foram os seguintes parâmetros de

rugosidade: Ra (Desvio Aritmético Médio do Perfil); Rq (Desvio Aritmético Quadrático do Perfil); Rz (Altura Máxima do Perfil) e Rt (Altura total do perfil).

A escolha dos valores de frequência foi efetuada a partir dos espectros de frequência dos sinais de vibração obtidos durante os pré-testes. Observou-se que a energia do sinal vibratório foi maior na faixa de frequência de 50 Hz a 150 Hz identificando esta região como aquela de maior influência da vibração. Ainda, a maioria dos equipamentos de ar condicionado disponíveis no mercado possuem motores que trabalham na frequência de 60 Hz. Estes equipamentos são instalados em laboratórios de metrologia e oficinas mecânicas sendo, portanto, fontes de vibração.

Os valores da aceleração foram definidos como sendo ($0,6 \text{ m/s}^2$, $1,0 \text{ m/s}^2$ e $1,6 \text{ m/s}^2$) porque para acelerações maiores resultou impossível avaliar a rugosidade das amostras, uma vez que não era possível manter o contato entre agulha do rugosímetro e a superfície da amostra.

3.3.3. Definição do planejamento de experimento

Definidas as variáveis e os níveis destas, procedeu-se à definição do planejamento de experimento, que neste caso é um planejamento fatorial completo 3^k , com $k=2$, totalizando nove testes, que foram replicados cinco vezes, totalizando 45 testes.

3.3.4. Seleção da matriz experimental

A Tabela 3.1 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial completo proposto.

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

Experimento	Fator 1 – Frequência (Hz)	Fator 2 – Aceleração (m/s^2)
1	-1 (60)	-1 (0,6)
2	0 (80)	-1 (0,6)
3	+1 (100)	-1 (0,6)
4	-1 (60)	0 (1,0)
5	0 (80)	0 (1,0)
6	+1 (100)	0 (1,0)
7	-1 (60)	+1 (1,6)
8	0 (80)	+1 (1,6)
9	+1 (100)	+1 (1,6)

A posterior análise dos resultados foi efetuada utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância, também conhecida como ANOVA, por meio do *software Statistic 7.0®*. O objetivo desta técnica é identificar quais são os fatores que produzem efeitos significativos nas variáveis de resposta, bem como identificar a relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes.

3.4 . Análise estatística por meio da ANOVA

A análise estatística dos resultados obtidos nos pré-testes e no planejamento fatorial foi efetuada por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando o *software Statistica 7.0®* e teve como objetivo investigar se há diferenças significativas entre os valores médios obtidos em diferentes condições de vibração para um determinado parâmetro. A análise de variância efetuada, então, consistiu na verificação da hipótese $H_0 (\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5)$ para os pré-testes e $(\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4)$ para o planejamento fatorial completo 3^2 . 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. Se esse valor for muito pequeno ($< 0,05$), pode-se concluir que existe uma relação linear entre a variável dependente, parâmetros *Ra*, *Rq*, *Rz* e *Rt*, e a variável independente, vibração.

3.5. Avaliação da incerteza de medição

A incerteza associada à medição dos parâmetros de rugosidade foi calculada aplicando-se o método de Monte Carlo. Para isso foram propostas as seguintes etapas:

1. Identificação das variáveis de influência;
2. Adoção do tipo de distribuição de probabilidade para cada uma das variáveis de influência e determinação de seus parâmetros estatísticos;
3. Definição dos modelos matemáticos;
4. Determinação do número de iterações;
5. Geração de números aleatórios, considerando cada tipo de distribuição;

6. Obtenção dos valores do mensurando;

7. Obtenção da função de distribuição de probabilidades do mensurando, o desvio padrão, os limites do intervalo de abrangência para um dado nível de confiança e as incertezas padrão combinada e expandida.

3.5.1. Identificação das variáveis de influência

Os parâmetros R_a , R_q , R_z e R_t são parâmetros de amplitude (ABNT NBR ISO 4287, 2002), assim são obtidos a partir das ordenadas dos pontos que definem o perfil de rugosidade. O número de pontos coletados depende do comprimento de amostragem, sendo que quando este assume os valores de 0,8 mm e 12,5 mm são coletados 8.000 ou 12.500 pontos, respectivamente.

Estes pontos são definidos pelas coordenadas X e Z gerando um gráfico bidimensional da rugosidade (perfil efetivo). Para determinar o valor da coordenada X de cada um destes pontos basta dividir o comprimento de avaliação pela quantidade total de pontos, enquanto que o valor da ordenada Z pode ser obtido por meio de alguns programas computacionais dedicados a alguns tipos de rugosímetros.

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

Cada parâmetro de rugosidade possui uma equação própria para determinação de seu valor numérico em função de sua definição. Estas equações foram utilizadas como ponto de partida para avaliação de incerteza de medição e são dadas a seguir.

As Equações mostradas em (2.1) e (2.4) foram utilizadas para determinar os valores de R_a , R_q , R_z e R_t , respectivamente.

Os valores das variáveis de entrada presentes nas Eqs (2.1) a (2.4), na medição com contato, podem ser influenciados por: resolução do rugosímetro (R); raio da ponta da agulha (r) (BHUSHAN, 2002, CHAND *et al.*, 2011), deformação da amostra durante a medição (D) (POON, BHUSHAN, 1995), amplitude da vibração (V) (ABNT NBR ISO 3274, 2008, LYNCEE TEC, 2012), afastamento da temperatura com relação a 20°C (ΔT), variação da

temperatura durante a medição (δT) e a incerteza associada à calibração do rugosímetro (IC). Ainda foi considerada a variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro ($s(L)$) (Leal, 2012).

Neste trabalho foram feitas algumas considerações levando a um número menor de variáveis de influência, são elas:

1) A amplitude das vibrações não foi considerada como uma variável individual, uma vez que a contribuição da mesma está incluída na variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro. O ISO TAG 4/WG 3 (2008) destaca que os efeitos de uma determinada variável de influência não devem ser considerados duplamente.

2) O afastamento da temperatura com relação a 20°C (ΔT) e a variação da temperatura durante a medição (δT) não foram considerados porque as medições foram efetuadas a temperatura ambiente de (25 ± 2) °C e em um intervalo de tempo curto.

3) Os valores numéricos dos parâmetros de amplitude dependem, além dos valores das ordenadas dos pontos, da variabilidade observada considerando os diferentes ciclos de medição executados.

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

3.5.2. Adoção do tipo de distribuição

Definidas as variáveis de influência se procedeu à coleta de informação sobre as mesmas. Em função da quantidade de informação disponível foi adotada uma distribuição de probabilidades para cada uma delas. Em seguida foram determinados os parâmetros estatísticos necessários à simulação conforme mostrado a seguir.

- *Resolução do rugosímetro e do interferômetro*

A resolução do rugosímetro (R) é de 0,01 μm e para avaliar a incerteza-padrão associada a esta variável foi adotada uma distribuição retangular, conforme mostra a Eq. (3.1).

$$u(R) = u(Ri) = \frac{\text{Resolução}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (3.1)$$

O ISO TAG 4WG-3 (2008) recomenda o uso desta distribuição quando a quantidade de informação sobre a variável considerada é limitada.

- *Raio da ponta da agulha*

O raio (r) da ponta da agulha do rugosímetro é de 2 μm , sendo esta a única informação disponível, desta forma a distribuição adotada para avaliação da incerteza padrão foi a retangular. De acordo com Haitjema (1998), considerou-se que a parcela de contribuição desta variável é da ordem de 2% do valor do parâmetro de rugosidade avaliado, Eq. (3.2).

$$u(r) = \frac{0,02 \cdot P}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Onde P representa o valor médio do parâmetro avaliado

- *Deformação da amostra durante a medição*

Para determinação da incerteza padrão associada à deformação (D) da amostra foi utilizada uma distribuição retangular, Eq. (3.3). De acordo com Leach (2001) o valor da deformação experimentada pela amostra durante a medição, neste trabalho, foi adotado como sendo 20 nm.

$$u(D) = \frac{D}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

- *Incerteza associada à calibração do rugosímetro e do interferômetro*

A incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro e do interferômetro ($u(C)$) e ($u(Ci)$) está declarada nos Certificados de Calibração destes equipamentos. Em ambos os casos a distribuição adotada é a t-Student. A padronização da incerteza expandida foi efetuada por meio das Eqs. (3.4) e (3.5).

$$u(C) = \frac{U(C)}{k} \quad (3.4)$$

$$u(Ci) = \frac{U(Ci)}{ki} \quad (3.5)$$

Onde $U(C)$ e $u(Ci)$ são as incertezas expandidas e k e k_i os fatores de abrangência declarados nos Certificados de Calibração do rugosímetro e do interferômetro respectivamente.

- *Variabilidade dos valores do parâmetro avaliado*

Para determinação da incerteza padrão associada à variabilidade das leituras foi utilizada a distribuição t-Student, conforme indica a Eq. (3.6).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (3.6)$$

Em que s é o desvio padrão experimental e n é o número de ciclos de medição efetuados.

O ISO TAG 4WG-3 (2008) recomenda o uso desta distribuição quando há informações suficientes sobre a variável em questão, tais como, um conjunto de valores ou amostra.

3.5.3. Definição dos modelos matemáticos

Os parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt são determinados a partir dos valores das ordenadas de pontos que definem o perfil de rugosidade. Por sua vez, o valor numérico destas ordenadas depende de um conjunto de fatores ou variáveis de influência definidas anteriormente.

Desta forma, na medição com contato, o modelo matemático para avaliação da incerteza de medição é dado pela Eq. (3.7).

$$Incerteza(PR) = \Delta s(L) + \Delta R + \Delta IC + \Delta r + \Delta D \quad (3.7)$$

Onde:

$Incerteza(PR)$ é a incerteza do parâmetro de rugosidade;

$\Delta s(L)$ é a correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo rugosímetro;

ΔR é a correção associada à resolução do rugosímetro;

ΔIC é a correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro;

Δr é a correção associada ao raio da ponta;

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

Enquanto que o modelo matemático adotado para avaliação da incerteza na medição sem contato é mostrado na Eq. (3.8).

$$\text{Incerteza (PR)} = \Delta s(Li) + \Delta Ri + \Delta ICI \quad (3.8)$$

Onde:

$\Delta s(Li)$ é a correção associada à variabilidade aos valores indicados pelo interferômetro;

ΔRi é a correção associada à resolução do interferômetro;

ΔICI é a correção associada à incerteza da calibração do interferômetro.

3.5.4. Determinação do número de iterações para aplicação do Método de Monte Carlo (MMC)

As simulações necessárias para aplicação do MMC foram realizadas utilizando o Excel 2007. Tomando como referência os trabalhos desenvolvidos por Piratelli-Filho e Di Giacomo (2003), Costa (2012) e Leal (2013) foi utilizado como ponto de partida para a simulação $M=50.000$.

Como critério de parada foram considerados os seguintes requisitos.

- Formato aproximadamente normal da FDP da variável de saída;
- Coeficiente de assimetria próximo a zero;
- Coeficiente de achatamento próximo de 3;
- Estabilidade dos valores da incerteza padrão combinada.

3.5.5. Geração de números aleatórios

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

Embora exista a possibilidade de gerar números aleatórios de forma rápida por meio de funções específicas (Fig. 3.11), a quantidade de números gerados é limitada não sendo possível utilizar estas funções para aplicação do método de Monte Carlo.

A Figura 3.11 mostra um diagrama de blocos com o passo a passo da simulação. Enquanto que a Fig. 3.12 mostra a janela onde são definidas as características da simulação. Entre outros aspectos devem ser definidos o número de variáveis, o número de números aleatórios (iteraões), o tipo de distribuição e o intervalo de entrada de probabilidade e valor.

Por sua vez, a Figura 3.13 mostra os diferentes tipos de distribuição que podem ser gerados por meio do Excel 2007.

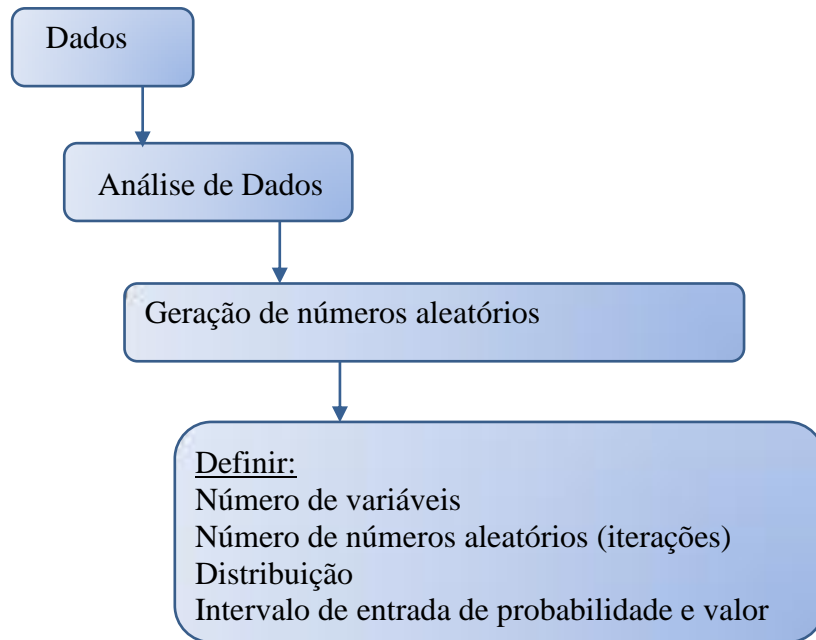


Figura 3.11 - Diagrama de bloco com as informações para simulação no Excel 2007

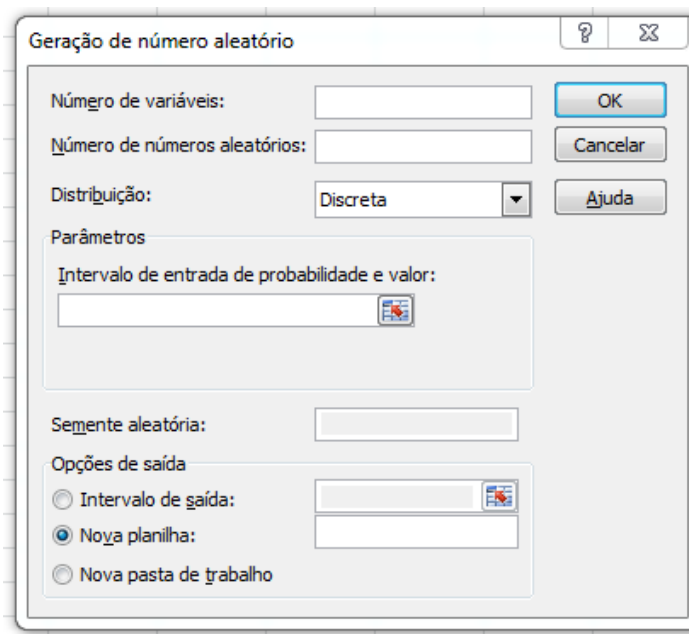


Figura 3.12 - Janela para geração de números aleatórios no Excel 2007

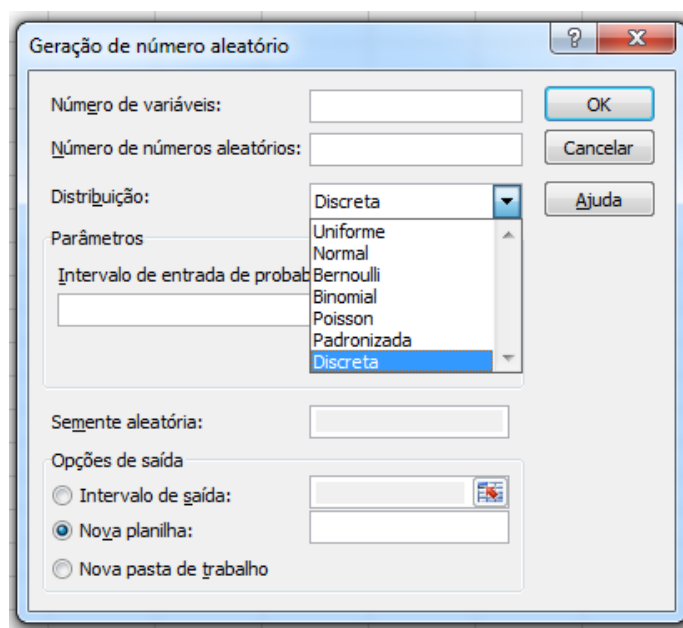


Figura 3.13 – Distribuições disponíveis no EXCEL, 2007 para a simulação de números aleatórios

Testes efetuados em computadores diferentes mostraram que o número de iterações é menor que 40.000. Assim sendo, resulta necessário utilizar “funções” disponíveis no Excel (Tab. 3.2) para gerar os vetores com os valores correspondentes a cada variável de entrada. Para isso foram consideradas as distribuições de probabilidade adotadas em cada caso.

Tabela 3.2 – Funções utilizadas durante a simulação (EXCEL, 2007)

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

No caso específico da função ALEATÓRIO() deve-se destacar que por meio desta é possível gerar um número positivo entre zero e um, apenas. Não sendo possível a priori gerar o número no intervalo de interesse. Desta forma deve-se em primeiro lugar multiplicar esse número pela incerteza padrão da variável analisada e em um segundo momento deve-se

efetuar uma perturbação para que os valores simulados fiquem com esperança igual a zero como recomendado pelo Suplemento 1 (BIPM, 2008).

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

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

3.5.6. Obtenção dos valores do mensurando

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

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

Os valores do mensurando foram organizados em ordem crescente. Em seguida a FDP do mensurando foi obtida e foram identificados os limites inferior e superior do intervalo e calculado o coeficiente de assimetria (*skewness*). Por fim foi determinada a incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95,45%, usualmente utilizada na maioria das aplicações da metrologia dimensional.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois de apresentados os aspectos teóricos e os procedimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, cabe fazer a apresentação e discussão dos resultados. Para facilitar o entendimento os mesmos foram divididos em três itens: (1) resultados da medição (com contato e sem contato) em condições sem vibração; (2) resultados dos pré-testes e (3) resultados do experimento fatorial completo 3^2 . Em todos os casos são apresentados e discutidos os valores de incerteza associados à medição. Nos itens 2 e 3 são apresentados, ainda, os resultados da ANOVA.

4.1. Resultados da medição da rugosidade na condição C0, sem vibração

A seguir são apresentados os resultados obtidos durante a medição com contato e sem contato da rugosidade das três amostras avaliadas.

4.1.1. Resultados da medição com contato da amostra de alumínio. Sem vibração, condição C0

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados o perfil efetivo de rugosidade e a curva de Abbott Firestone, respectivamente obtidos durante a medição da amostra de alumínio.

O perfil de rugosidade mostrado na Fig. 4.1 é um perfil periódico, onde não há picos e vales isolados, característico do processo de aplainamento. A distribuição de picos e vales é uniforme, sendo que os valores das ordenadas dos pontos do perfil variam entre $-5\text{ }\mu\text{m}$ e $4\text{ }\mu\text{m}$.

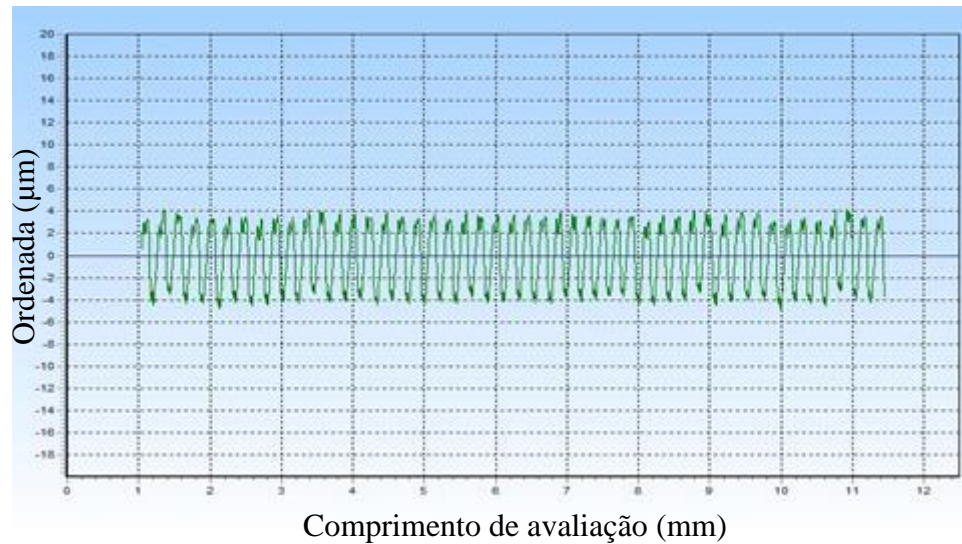


Figura 4.1. Perfil efetivo de rugosidade da amostra de alumínio na medição 1, com contato

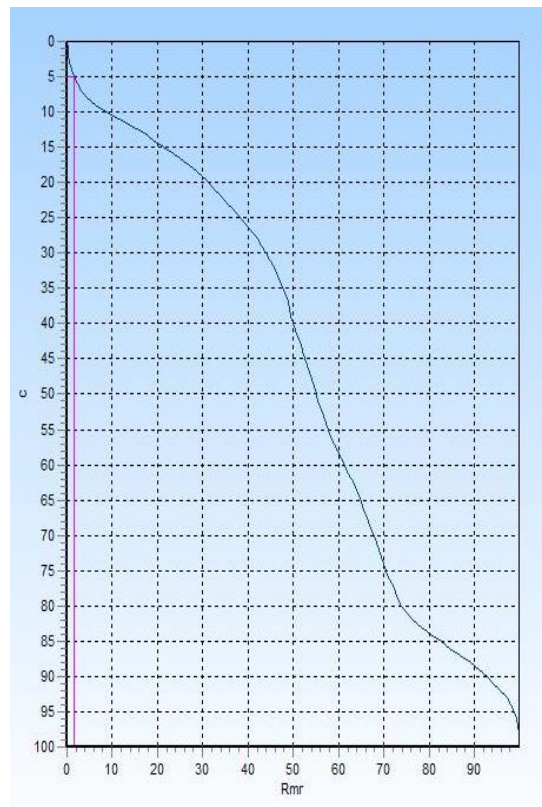


Figura 4.2. Curva de Abbott Firestone para a amostra de alumínio na medição 1

A curva de Abbott Firestone mostrada na Figura 4.2 revela que 10% da altura do perfil corresponde a apenas 10% do material da amostra. De 10 a 90% da altura encontra-se 80% do material, para 50% de altura tem-se 55% do material e nos últimos 10% da altura, 10% do material. Portanto conclui-se que o perfil possui uma distribuição uniforme de picos e vales, evidenciado no perfil de rugosidade da Fig. 4.1.

4.1.2. Resultados da medição sem contato da amostra de alumínio. Sem vibração (Condição C0)

Uma imagem, sem processamento, da superfície da amostra de alumínio obtida no interferômetro por meio de luz branca para uma área de $1,0 \text{ mm}^2$ é apresentada na Fig. 4.3.

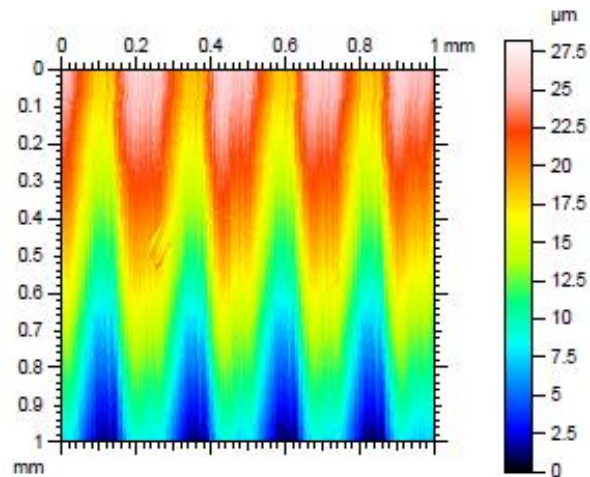


Figura 4.3. Imagem sem processamento da superfície da amostra de alumínio com área de $1,0 \text{ mm}^2$

Na Figura 4.3 observa-se que a amostra apresenta um desvio de paralelismo significativo entre a superfície avaliada e a superfície apoiada diretamente na mesa do interferômetro. Necessitando, portanto de um nivelamento para eliminar este desvio macrogeométrico. A imagem resultante é mostrada na Fig. 4.4.

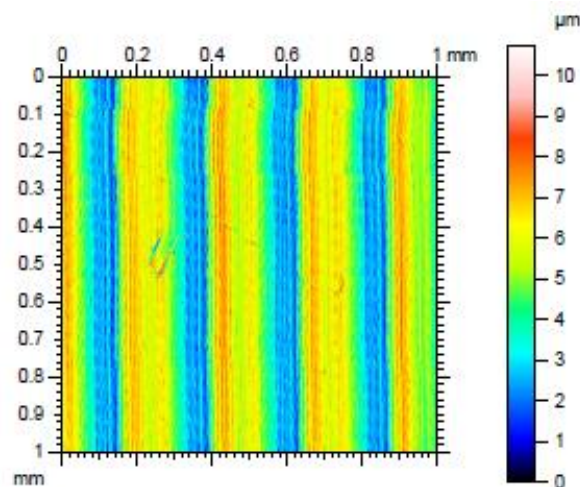


Figura 4.4. Imagem da superfície da amostra de alumínio após o nivelamento

Na Figura 4.5 é apresentada a topografia da superfície da amostra de alumínio. 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.

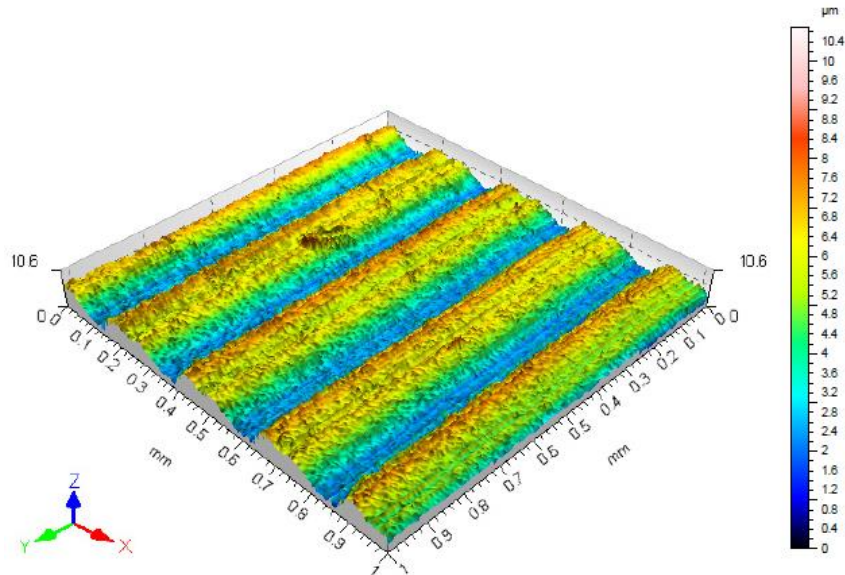


Figura 4.5. Topografia da superfície da amostra de alumínio em 3D

A Figura 4.6 mostra um perfil de rugosidade obtido por meio do interferômetro para a medição utilizando um comprimento de amostragem de 2,5 mm.

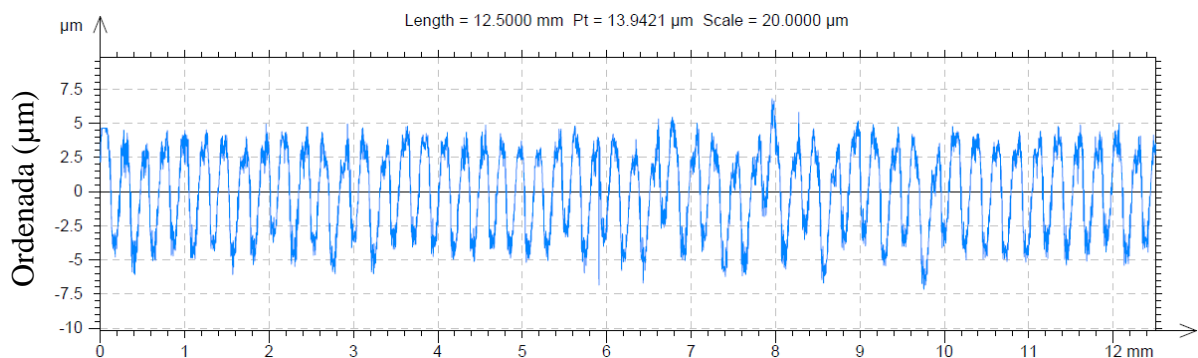


Figura 4.6. Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de alumínio

Ao comparar os perfis de rugosidade mostrados nas Fig. 4.1 (com contato) e 4.6 (sem contato) observa-se que eles são similares com relação ao formato, mas com leves diferenças de amplitude, sendo que os valores das ordenadas dos pontos do perfil na medição sem

contato variam entre $-7,5 \mu\text{m}$ e $6,0 \mu\text{m}$ e na medição com contato variam entre $-5,0 \mu\text{m}$ e $4,0 \mu\text{m}$.

Os valores dos parâmetros (Ra , Rq , Rz e Rt) obtidos por ambos os métodos de medição são apresentados na Fig. 4.7.

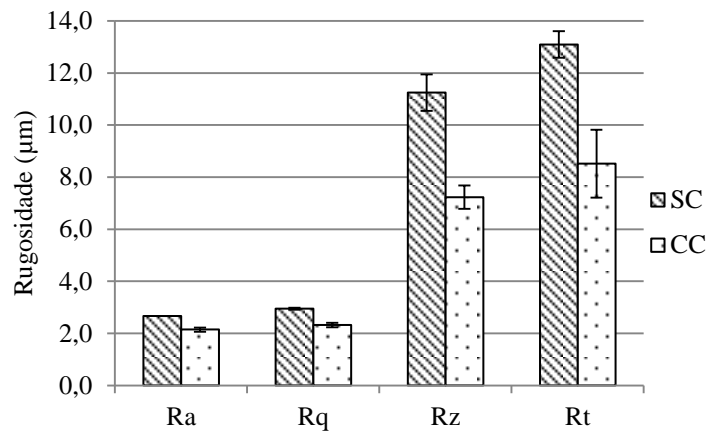


Figura 4.7. Valores de rugosidade obtidos por ambos os métodos com contato e sem contato para a amostra de alumínio, na condição sem vibração (68,27 % de confiabilidade)

Pode-se observar na Fig. 4.7 que os valores médios de rugosidade obtidos durante a medição sem contato são maiores que aqueles encontrados para a medição com contato. Isto pode ser justificado devido a que a agulha não pode acessar os vales mais estreitos. Também, porque a rugosidade da amostra não se apresenta de forma homogênea e principalmente porque a amostra avaliada é de alumínio. Cabe ressaltar que a elevada ductilidade deste material leva ao aparecimento de uma deformação quando a agulha do rugosímetro apalpa a amostra. Como mostrado no Apêndice 1.

A Figura 4.8 mostra os histogramas obtidos durante a avaliação da incerteza de medição com contato e sem vibração, utilizando o Método de Monte Carlo, para os parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt , respectivamente.

Observa-se na Fig. 4.8 que a distribuição da variável de saída ou mensurando (Ra , Rq , Rz e Rt) é muito próxima da normal em todos os casos. O coeficiente de assimetria obtido foi de 0,009, 0,006, 0,008 e 0,010 para os quatro parâmetros avaliados, respectivamente. Desta forma, de acordo com INMETRO (2008) a média aritmética dos M valores do mensurando obtidos durante a simulação de Monte Carlo é considerada uma estimativa do mensurando avaliado e o desvio padrão representa a incerteza padrão associada.

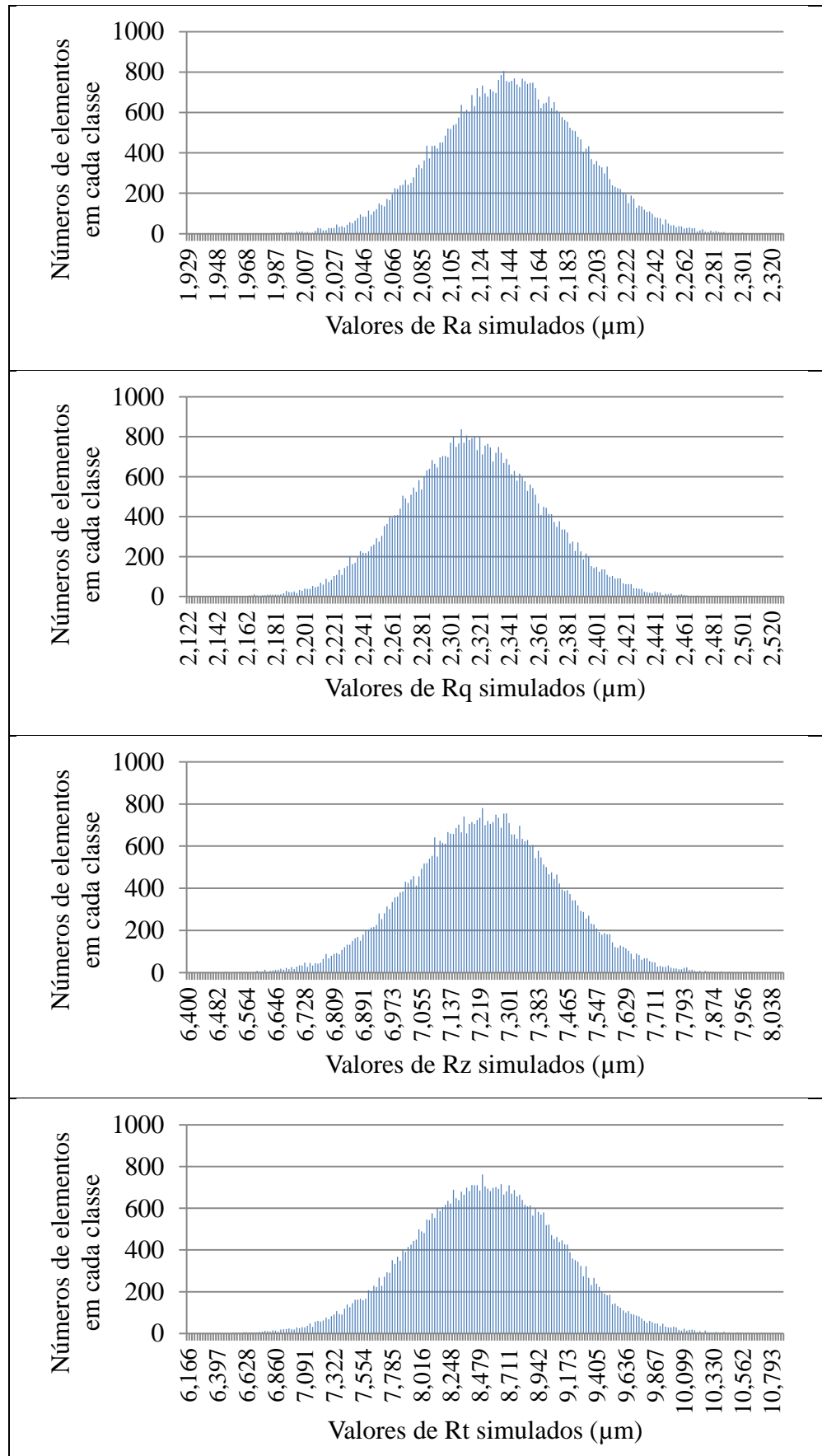


Figura 4.8. Histogramas obtidos na avaliação da incerteza de medição por meio do MMC na medição da amostra de alumínio com contato e sem vibração.

A probabilidade de abrangência da incerteza padrão é de apenas 68,27%, assim sendo essa incerteza foi multiplicada pelo fator de abrangência $k=2,00$, de forma a obter-se uma incerteza expandida com probabilidade de abrangência de 95,45%.

Todos os histogramas obtidos na avaliação da incerteza de medição, com contato e sem contato, das três amostras avaliadas, na condição sem vibração apresentam formato próximo da distribuição normal e simétrico. Portanto, não são aqui apresentados. Cabe destacar que esta observação é válida, também, para todas as condições investigadas durante os pré-testes e no planejamento fatorial completo.

A Figura 4.9 apresenta os valores de incerteza associados à medição com e sem contato.

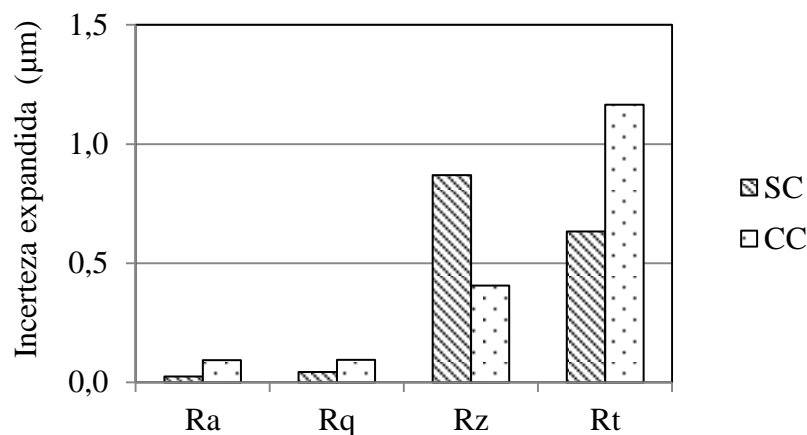


Figura 4.9. Incerteza expandida associada à medição da amostra de alumínio, sem vibração.

A incerteza expandida associada à medição dos parâmetros R_a , R_q e R_t foi maior para a medição com contato, enquanto que para o parâmetro R_z a medição sem contato exibe o maior valor de incerteza.

4.1.3. Resultados da medição com contato de amostra de aço inox. Sem vibração (Condição C0)

O perfil efetivo de rugosidade e a curva de Abbott Firestone obtidos durante a medição da amostra de aço inox são mostrados nas Figs 4.10 e 4.11, respectivamente.

A Figura 4.10 exibe um perfil de rugosidade onde os valores de ordenadas variam entre $-1\ \mu\text{m}$ e $1\ \mu\text{m}$, indicando que a amostra possui valores de rugosidade pequenos. São observados dois picos isolados, com ordenadas de $2,7\ \mu\text{m}$ e $4,0\ \mu\text{m}$, que podem contribuir para a obtenção de valores elevados de R_z e R_t .

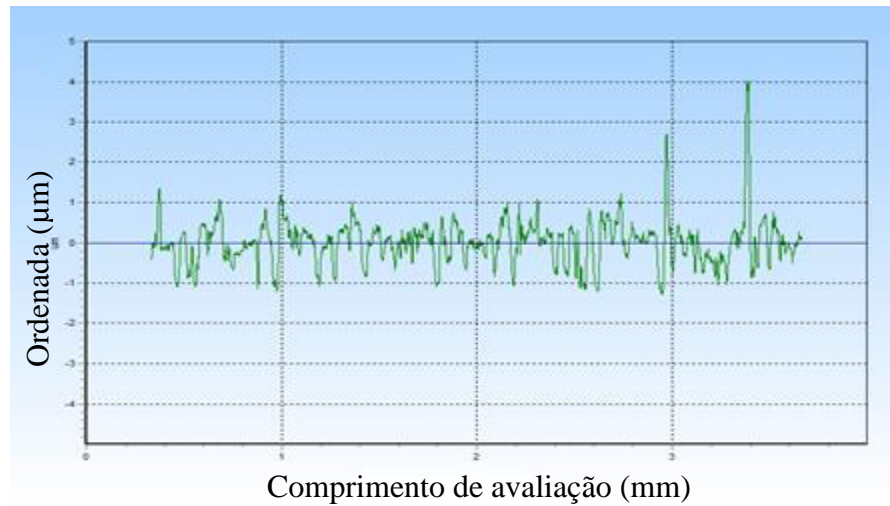


Figura 4.10. Perfil efetivo de rugosidade da amostra de aço inox na medição 1

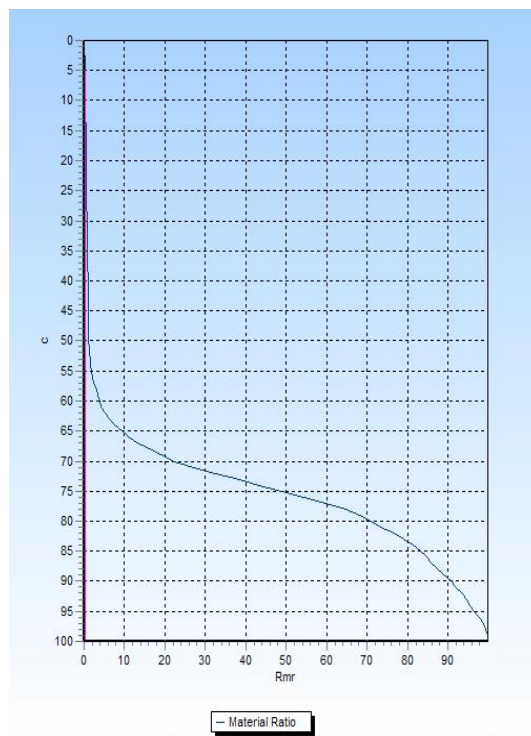


Figura 4.11. Curva de Abbott Firestone para a amostra de aço inox na medição 1

De acordo com a Fig. 4.11 constata-se que 65% da altura do perfil corresponde a apenas 10% do material da amostra. De 65% a 90% da altura encontra-se 90% do material e nos últimos 10% de altura tem-se apenas 10% do material. Pode-se concluir que não há uma distribuição uniforme de picos e vales.

4.1.4. Resultados da medição sem contato da amostra de aço inox. Sem vibração

A imagem da superfície sem processamento obtida durante a medição sem contato da amostra de aço inox é mostrada na Fig. 4.12.

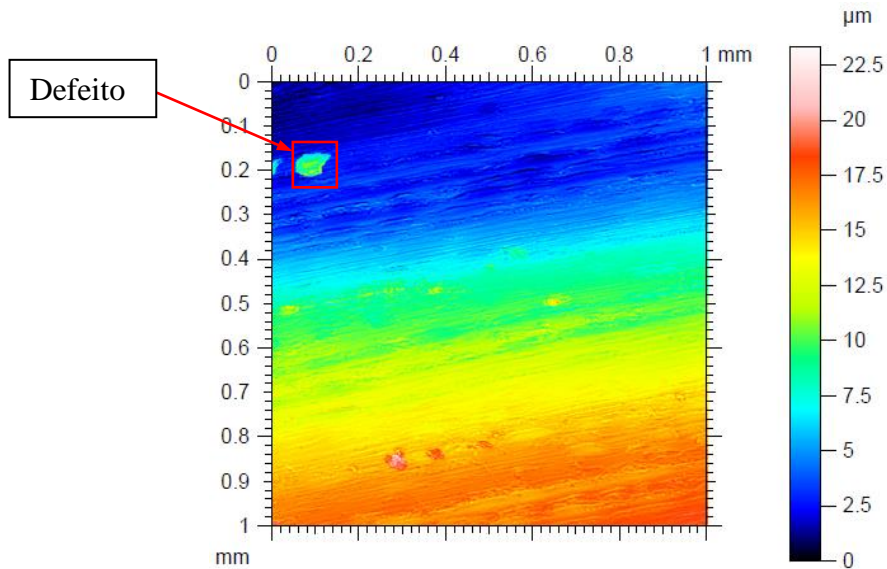


Figura 4.12 – Imagem, sem processamento, da superfície da amostra de aço inox, área de 1,0 mm²

Na Figura 4.12, observa-se além do desvio de orientação (paralelismo entre as superfícies da amostra) a presença de defeitos que não caracterizam a rugosidade. Assim sendo, além do nivelamento, foi aplicado o operador *Retouch Surface* para eliminar estes defeitos, obtendo-se a Fig. 4.13.

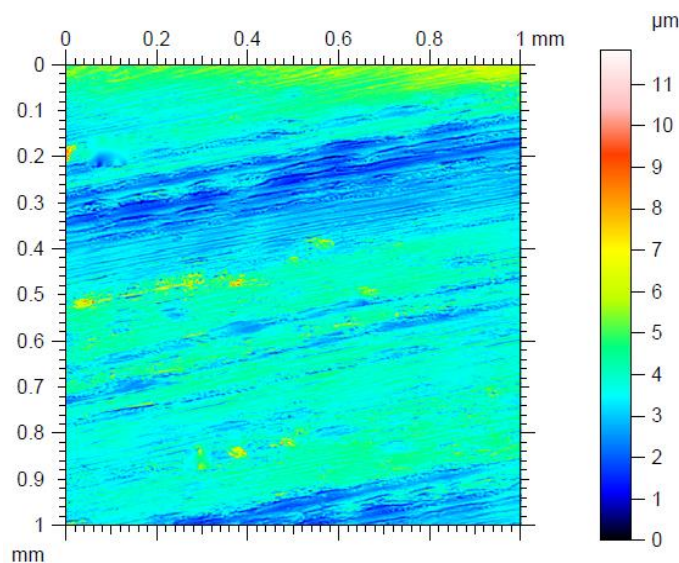


Figura 4.13 - Superfície da amostra de aço inox após o nivelamento e eliminação dos poros

A Figura 4.13 mostra também a presença de ondulações na superfície da amostra. Mesmo com a aplicação dos filtros (*cut-off* e Gauss) não foi possível eliminar as mesmas. Estes resultados são condizentes com aqueles obtidos por Leal (2013).

A topografia da superfície é apresentada na Fig. 4.14.

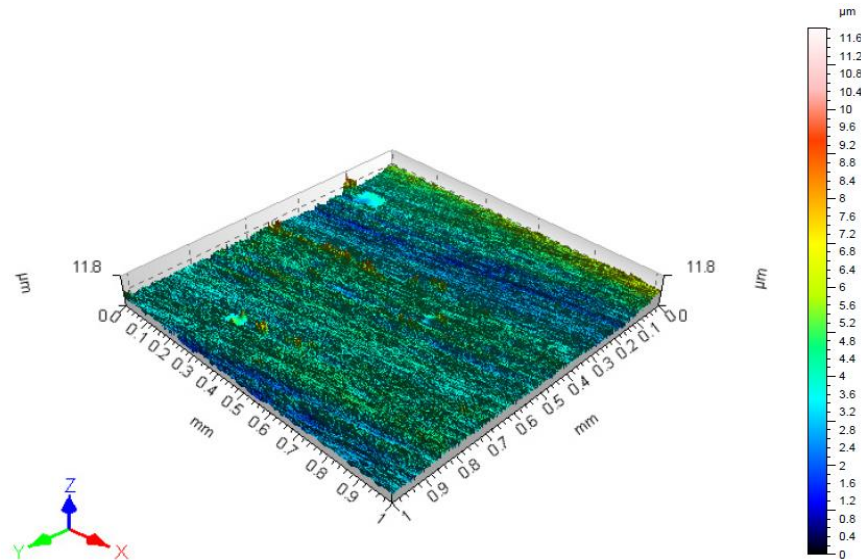


Figura 4.14 – Topografia da superfície da amostra de aço inox, área de 1,0 mm²

Na imagem da topografia da superfície (Fig. 4.14) é possível observar claramente a superposição das ondulações remanescentes e da rugosidade.

A seguir, na Fig. 4.15, é apresentado o perfil de rugosidade em 2D para a amostra de aço inox, obtido para um comprimento de amostragem de 0,8 mm.

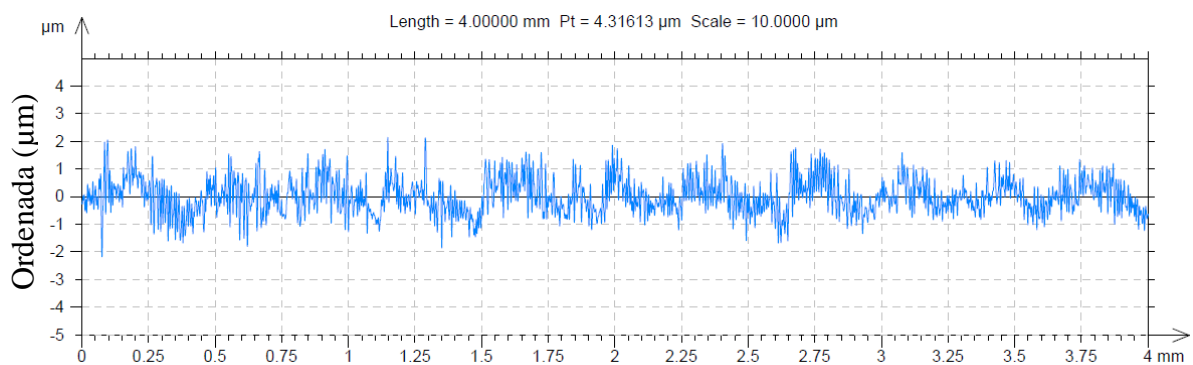


Figura 4.15 - Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de aço inox

O perfil de rugosidade mostrado na Fig. 4.15 apresenta um aspecto periódico ao longo do comprimento de avaliação, onde as ordenadas dos pontos do perfil variam entre $-2\text{ }\mu\text{m}$ e $2\text{ }\mu\text{m}$. Não são observados picos ou vales isolados, caracterizando este perfil como regular. Neste perfil são evidenciadas, também, as ondulações.

Comparando os perfis de rugosidade mostrados nas Fig. 4.6 e 4.15 observa-se que há diferenças significativas entre eles. Isto pode ser justificado porque a amostra de aço inox apresenta acabamento superficial melhor que a amostra de alumínio. À medida que os valores médios de rugosidade diminuem as diferenças observadas entre os resultados obtidos por ambos os métodos de medição de rugosidade (com e sem contato) tornam-se mais evidentes, conforme concluído por Chand *et al.* (2011). Segundo estes autores com a diminuição da rugosidade os vales se tornam mais estreitos e o perfil efetivo obtido na medição com contato se afasta mais do real.

A Figura 4.16 apresenta os valores de (Ra , Rq , Rz e Rt) obtidos por ambos os métodos de medição (com contato e sem contato) para a amostra de aço inox, na condição C0, sem vibração. Por sua vez, a Fig. 4.17 mostra os valores de incerteza obtidos em cada caso.

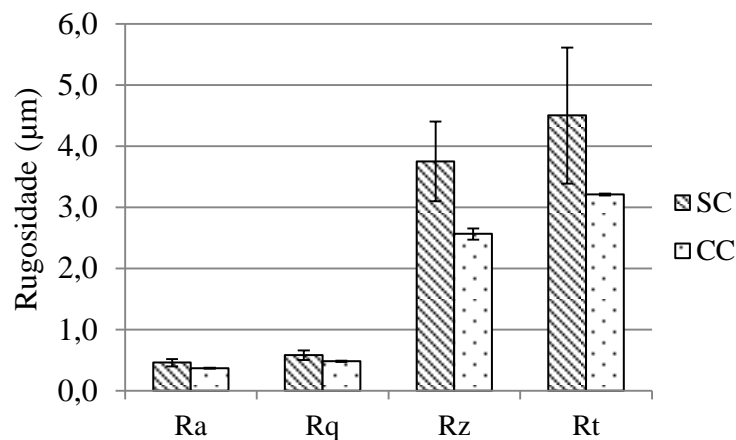


Figura 4.16. Valores sem contato e com contato para a amostra de aço inox, na condição sem vibração (68,27 % de confiabilidade)

Pode-se observar na Fig. 4.16 que os valores médios de rugosidade obtidos durante a medição sem contato são maiores que aqueles encontrados para a medição com contato. Observa-se que os valores de incerteza expandida associada aos parâmetros de rugosidade Ra e Rq obtidos por meio de ambos os métodos de medição são similares (Fig. 4.17). A medição sem contato exibe os maiores valores de incerteza para os parâmetros Rz e Rt sendo que as

diferenças observadas com relação à medição com contato são da ordem de 28% e 31%, respectivamente.

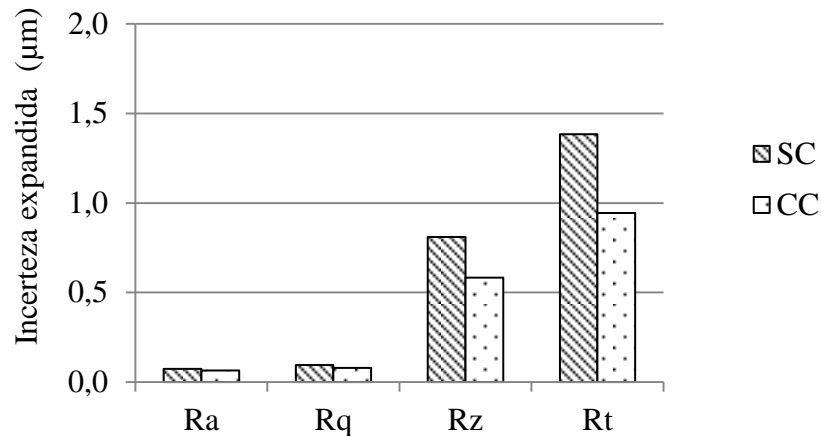


Figura 4.17. Valores de incerteza obtidos na medição com e sem contato para a amostra de aço inox, na condição sem vibração

4.1.5. Resultados da medição com contato da amostra de aço carbono. Sem vibração (Condição C0)

O perfil efetivo de rugosidade e a curva de Abbott Firestone para a amostra de aço carbono não são apresentados, porque houve uma falha de comunicação entre o rugosímetro e o programa computacional dedicado. Apesar dos esforços o problema não foi resolvido até o fechamento deste trabalho. Pensou-se na possibilidade de utilizar outro rugosímetro, mas isto comprometeria as condições de repetibilidade nas quais os experimentos foram conduzidos. Sendo assim serão apresentados somente os valores correspondente aos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt .

4.1.6. Resultados da medição sem contato da amostra de aço carbono. Sem vibração

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram as imagens da amostra de aço carbono obtidas durante a medição sem contato, considerando uma área de 1,0 mm².

Na Figura 4.18 observam-se sulcos inerentes ao processo de fabricação da amostra (torneamento). Embora pequena, pode-se observar a curvatura dos sulcos deixados pela ferramenta de torner durante o faceamento. Neste caso o sulco impresso na superfície tem o formato de uma espiral. A figura exhibe, ainda, uma grande quantidade de defeitos (poros) na superfície da amostra, os quais são melhor evidenciados na Fig. 4.19.

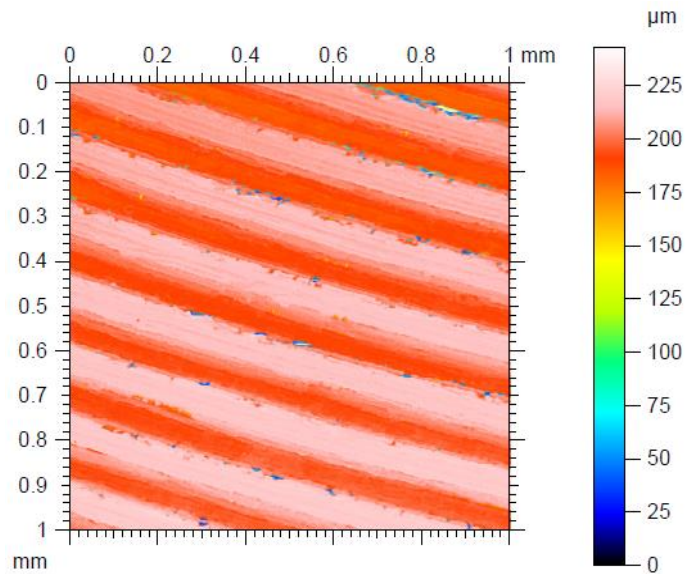


Figura 4.18 - Superfície sem processamento da amostra de aço carbono, área de 1,0 mm²

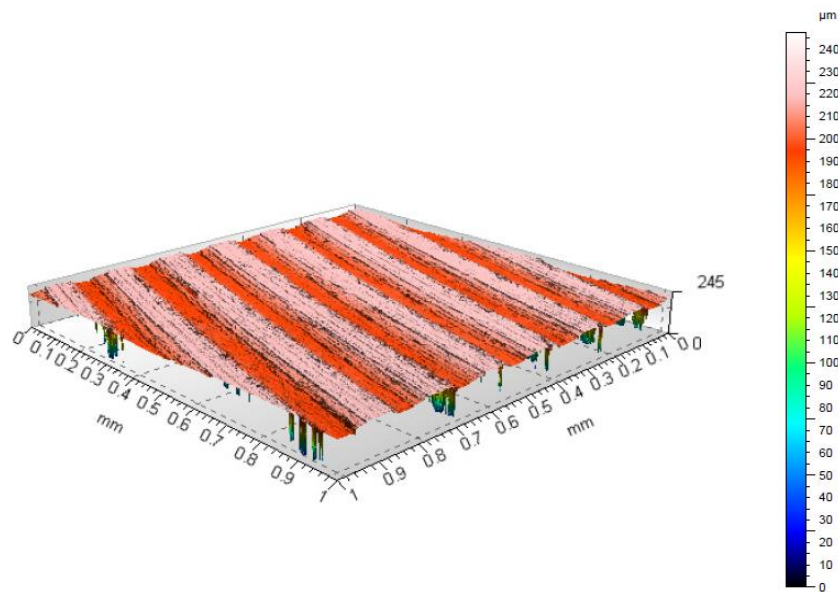


Figura 4.19 - Topografia da superfície da amostra de aço carbono, área de 1,0 mm²

A Figura 4.20 mostra um perfil de rugosidade com aspecto periódico ao longo do comprimento de avaliação, onde não há picos e vales isolados, caracterizando um perfil regular. São observados, ainda, os defeitos presentes na amostra o que tornou necessária a aplicação de um filtro adicional (filtro de Abbott Firestone) para retirada dos mesmos, conforme efetuado por Piratelli-Filho *et al* (2012) , obtendo-se a Fig. 4.21.

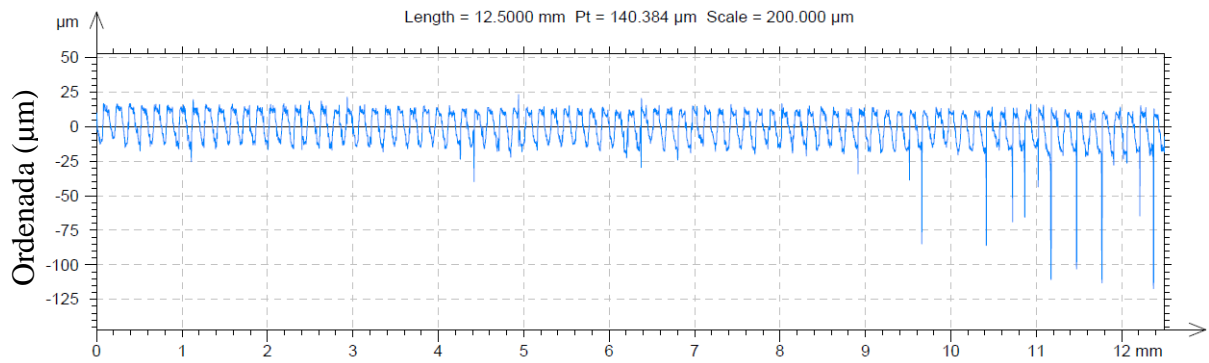


Figura 4.20. Perfil efetivo em 2D obtido por interferometria e luz branca para a amostra de aço carbono

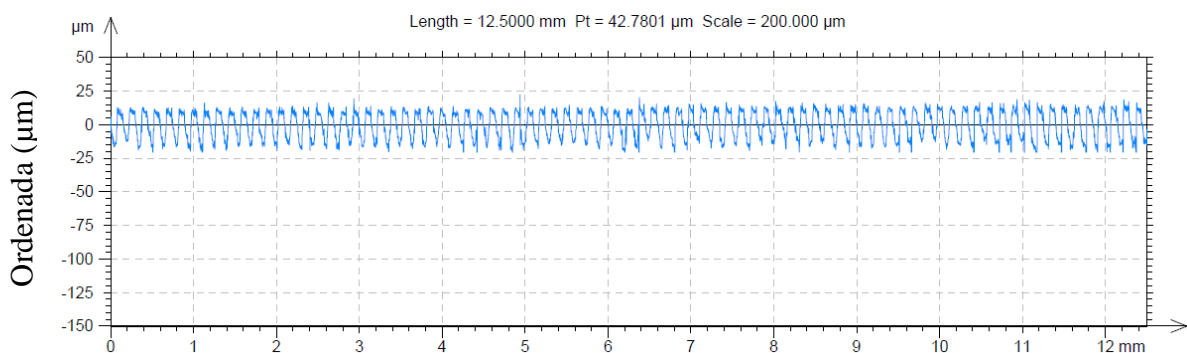


Figura 4.21. Perfil efetivo obtido na medição da amostra de aço carbono após a aplicação do filtro de Abbott Firestone

As ordenadas dos pontos do perfil de rugosidade variam entre $-20\ \mu\text{m}$ e $22\ \mu\text{m}$. Desta forma, esperam-se para a amostra de aço carbono os maiores valores de rugosidade, quando consideradas as três amostras avaliadas.

A Figura 4.22 apresenta os valores de (R_a , R_q , R_z e R_t) obtidos por ambos os métodos de medição (com contato e sem contato) para a amostra de aço carbono na condição sem vibração.

Observa-se, na Fig. 4.22, que os valores médios de rugosidade obtidos durante a medição sem contato são significativamente maiores que aqueles encontrados para a medição com contato. Neste caso, em particular, a grande quantidade de poros devidos a oxidação presentes na superfície da amostra de aço carbono pode ter contribuído para aumentar a diferença entre os resultados obtidos por ambos os métodos de medição.

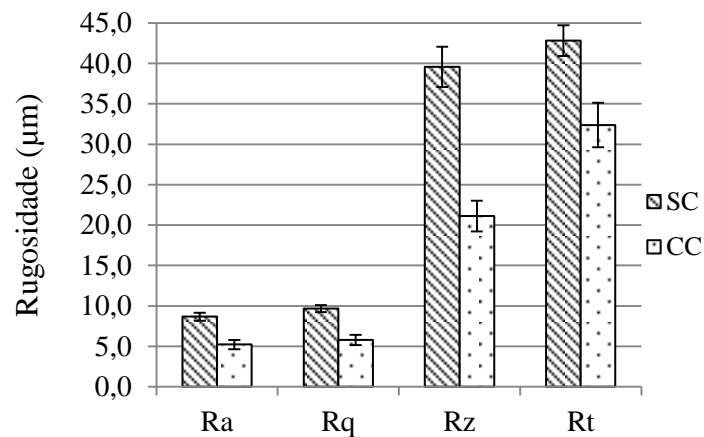


Figura 4.22. Valores de rugosidade obtidos sem contato e com contato para a amostra de aço carbono, na condição sem vibração (68,27 % de confiabilidade)

A Figura 4.23 apresenta os valores de incerteza expandida associados à medição da amostra de aço carbono.

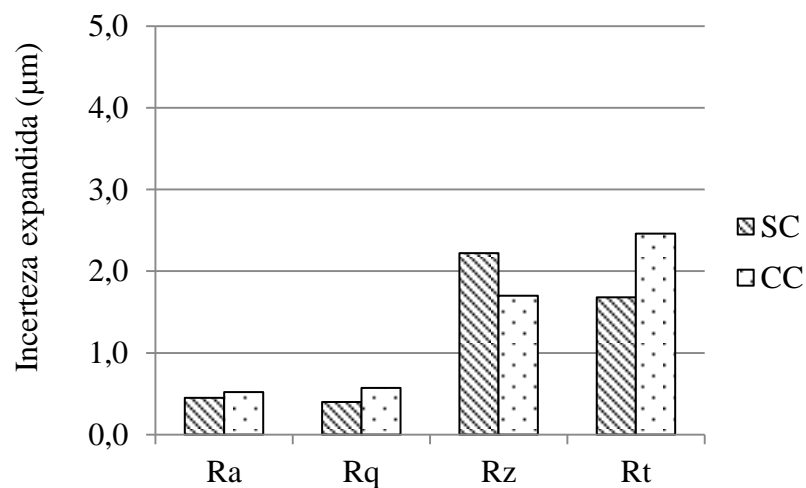


Figura 4.23. Valores de incerteza expandida associados à medição sem contato e com contato para a amostra de aço carbono, na condição sem vibração

A medição sem contato da rugosidade apresenta valores de incerteza significativamente maiores que aqueles encontrados na medição com contato. Este resultado é decorrente dos elevados valores de desvios-padrão associados aos valores médios de todos os parâmetros. Muito provavelmente em decorrência dos poros presentes na superfície da amostra.

A Figura 4.24 mostra o incremento, em porcentagem, observado entre os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos na medição sem contato para as três amostras avaliadas, na

condição *C0* sem vibração. Cabe ressaltar que foi tomado como referência (100%) o valor de rugosidade obtido na medição com contato.

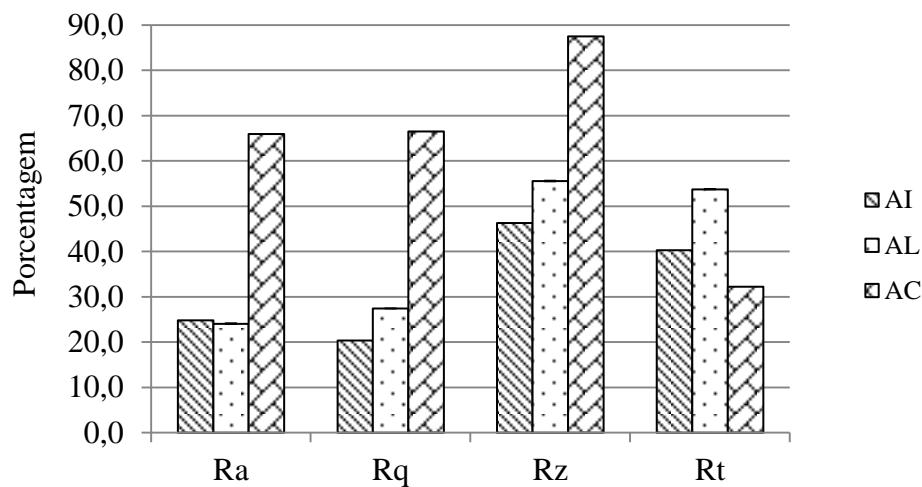


Figura 4.24. Diferenças percentuais entre os valores dos parâmetros de rugosidade obtidos sem contato e com contato para as três amostras

Pode-se concluir a partir da Fig. 4.24 que os valores de rugosidade obtidos na medição sem contato foram significativamente maiores para as três amostras avaliadas. Para a amostra de aço inox (AI) que exibiu os menores valores de rugosidade as diferenças observadas foram de 24%, 20%, 46% e 40% para *Ra*, *Rq*, *Rz* e *Rt*, respectivamente. Estas podem ser justificadas porque o acabamento superficial não é homogêneo na superfície da amostra, bem como, pela impossibilidade da agulha do rugosímetro acessar os vales mais estreitos.

Por sua vez, para a amostra de alumínio (AL) foram de 24%, 27%, 55% e 53%, respectivamente. Estas diferenças podem ser atribuídas à deformação que a agulha provoca na amostra durante a medição, também pelo acabamento não se apresentar de forma homogênea na superfície da amostra. Por fim para a amostra de aço carbono (AC) as diferenças observadas foram de 65%, 66%, 87% e 32% para *Ra*, *Rq*, *Rz* e *Rt*, respectivamente. Muito provavelmente a grande quantidade de defeitos presentes na superfície contribuiu para este fato.

Na Figura 4.24 observa-se, ainda, que o *Rt* na amostra de aço carbono não seguiu a tendência tanto em relação aos demais parâmetros quanto em relação as demais amostras. Este parâmetro de rugosidade descreve a máxima deterioração da amostra e, portanto, é fortemente influenciado por picos e/ou vales isolados presentes na superfície e por defeitos que não fazem parte da rugosidade, como poros e danos decorrentes da manipulação

inadequada. Outro fator que pode contribuir para a deterioração da amostra é a oxidação, uma vez que o aço carbono tem uma tendência grande á oxidação.

4.2. Resultados dos pré-testes em amostra de alumínio com vibração

Apos definidos os valores dos parâmetros de rugosidade das amostras sem vibração (condição C0), as mesmas foram medidas novamente em condições sujeitas a perturbações externas através de vibração definidas pelas condições: C1 (100 Hz/0,04 m/s²); C2 (100 Hz/0,08 m/s²); C3 (100 Hz/0,13 m/s²) e C4 (100 Hz/0,17 m/s²). Para uma melhor visualização destas condições é apresentado através da Fig. 4.25 o espectro de frequência para estas quatro condições de pré-teste.

A frequência de 100 Hz foi utilizada para a realização dos pré-teste devido ser a frequência media da banda de 50 Hz a 150 Hz.

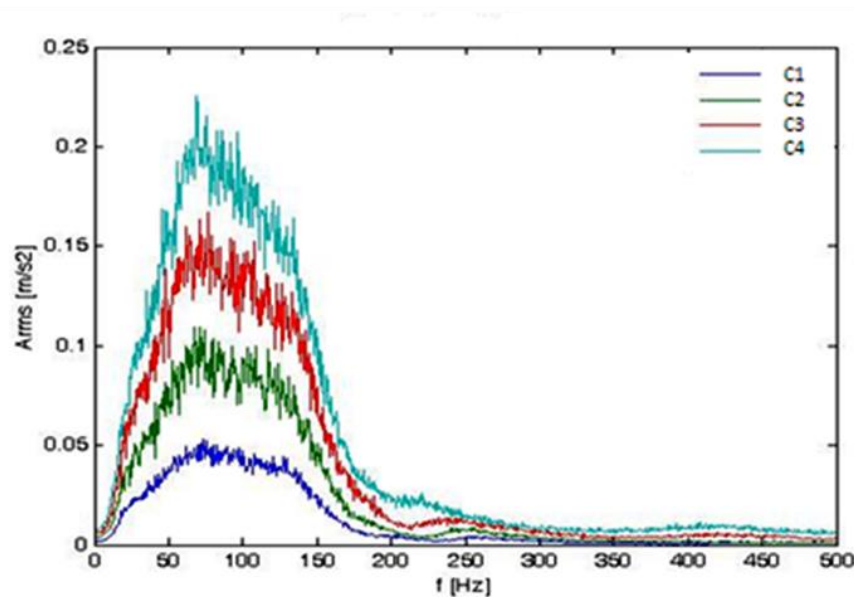


Figura 4.25. Espectros de frequência das quatro condições do pré-teste

A Tabela 4.1 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_t) medidos e os desvios-padrão (s) associados para as quatro condições investigadas durante os pré-testes na banda de frequência de 50 Hz a 150 Hz, com frequência centrada em 100 Hz, na amostra de alumínio, são elas: C1 ($a=0,04$ m/s²), C2 ($a=0,08$ m/s²), C3 ($a=0,13$ m/s²) e

C4 ($a=0,17 \text{ m/s}^2$). Para comparação foram acrescentados os resultados obtidos na condição sem vibração, denominada de C0.

Os valores de vibração foram associados a acelerações impostas no rugosímetro através de um excitador eletrodinâmico conforme foi apresentado na Fig. 3.8 do Capítulo III. Os valores de acelerações foram definidos experimentalmente, começando por um valor em que a vibração não apresentava interferência nos valores dos parâmetros de rugosidade e foram aumentando até que sua interferência provocasse alterações significativas dos valores dos parâmetros de rugosidade medidos. Estas informações podem ser vistas através da Tab. 4.1.

Tabela 4.1. Valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt e desvios-padrão associados (s)

	C0 (0 m/s ²)		C1 (0,04 m/s ²)		C2 (0,08 m/s ²)		C3 (0,13 m/s ²)		C4 (0,17 m/s ²)	
	\bar{x} (μm)	s (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)	\bar{x} (μm)	s (μm)
Ra	2,627	0,008	2,637	0,018	2,632	0,018	2,647	0,015	2,629	0,004
Rq	2,859	0,007	2,870	0,017	2,867	0,008	2,882	0,012	2,870	0,011
Rz	8,892	0,062	8,947	0,091	9,140	0,196	9,386	0,198	9,598	0,495
Rt	9,280	0,105	9,339	0,201	9,696	0,343	10,203	0,964	10,240	0,999

A partir da Tab. 4.1 conclui-se que os valores médios de Ra e Rq permanecem praticamente constantes para as cinco condições investigadas, bem como os valores de desvio-padrão. Enquanto que os valores médios de Rz e Rt crescem com o aumento da amplitude da vibração na frequência de 100 Hz, melhor evidenciado na Fig. 4.26 que mostra, ainda, uma tendência crescente dos valores de desvio-padrão para os parâmetros Rz e Rt à medida em que a amplitude da vibração aumenta.

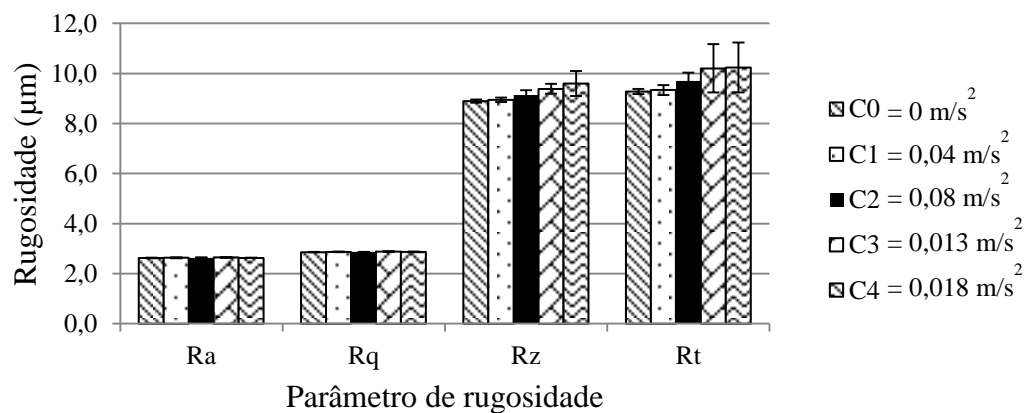


Figura 4.26. Valores dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt com o desvio padrão das cinco condições investigadas (68,27 % de confiabilidade)

A Figura 4.27 mostra os valores de incerteza expandida encontrados para todos os parâmetros avaliados nas cinco condições consideradas. Observa-se que a incerteza expandida se manteve praticamente constante para os parâmetros Ra e Rq enquanto que para Rz e Rt foi influenciada significativamente pela variabilidade dos valores indicados pelo rugosímetro e consequentemente pelo aumento da amplitude da vibração. Em todos os casos o fator de abrangência é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95,45%.

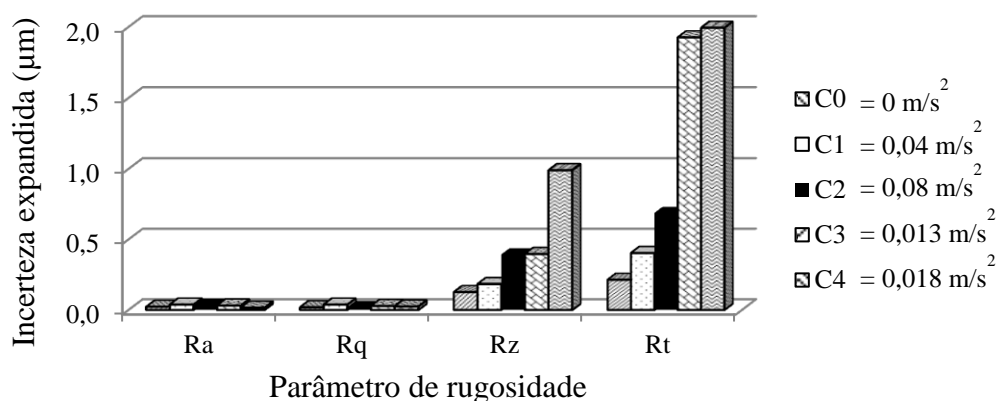


Figura 4.27. Valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade durante os pré-testes (95,45%)

A Tabela 4.2 mostra os valores de p -valor obtidos durante a análise de variância para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados.

Tabela 4.2 Valores de p -valor obtidos por meio da ANOVA e o teste significância.

Parâmetro	p -valor	Hipótese H0
Ra	0,417	Aceita ($p > 0,05$)
Rq	0,271	Aceita ($p > 0,05$)
Rz	0,035	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,003	Rejeita ($p < 0,05$)

A partir da Tab. 4.2, conclui-se que os valores médios dos parâmetros Ra e Rq não sofreram influências significativas à medida que a amplitude da vibração aumentou. Isto pode ser justificado devido à característica que estes dois parâmetros Ra e Rq possuem ao serem obtidos pela média das ordenadas dos pontos que definem o perfil bidimensional da

rugosidade. Em outras palavras, alterações pontuais nas ordenadas do perfil não são capazes de afetar significativamente os valores destes parâmetros.

Com relação aos valores médios de Rz e Rt observou-se que estes são estatisticamente diferentes. O que pode ser atribuído ao fato destes parâmetros serem determinados a partir da soma das ordenadas do pico mais alto e do vale mais profundo no comprimento de amostragem e de avaliação, respectivamente. Desta forma, mesmo quando não existirem picos e vales isolados no perfil de rugosidade o desvio-padrão destes parâmetros tende a ser maior, que aquele encontrado para Ra e Rq . Consequentemente, a incerteza de medição tende a ser maior.

Dos pré-testes conclui-se que os parâmetros de rugosidade, que representam rugosidades médias (Ra e Rq) não sofreram alterações na medida em que a aceleração aumentou na frequência de 100 Hz. Contudo, foram observadas diferenças significativas entre os valores de Rz e Rt coletados para diferentes valores de aceleração e das incertezas associadas. Desta forma, conclui-se que a vibração mecânica constitui uma fonte significativa de erros e de incertezas na medição da rugosidade, necessitando-se, portanto, de mais medições detalhadas destas condições de interferências.

Cabe ressaltar que embora o parâmetro Ra forneça a maior quantidade de informação, sozinho não permite caracterizar a rugosidade de uma superfície. Dependendo da aplicação para a qual uma determinada amostra destina-se, outros parâmetros devem também ser avaliados.

4.3. Resultados do experimento fatorial completo 3^2

Para uma melhor visualização dos resultados, foram feitos novos ensaios utilizando o planejamento fatorial e os mesmos são apresentados em três itens.

4.3.1. Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para a amostra de alumínio

Nestas medições foi analisado o efeito da vibração em três novas condições de frequência (60 Hz, 80 Hz e 100 Hz) com novos níveis de aceleração ($a=0,6 \text{ m/s}^2$, $a=1,0 \text{ m/s}^2$ e $a=1,6 \text{ m/s}^2$) para cada uma dessas frequências, caracterizando assim o experimento fatorial completo 3^2 .

As Figuras 4.28 a 4.30 mostram os valores médios de rugosidade (μm) em uma amostra de alumínio obtidos em diferentes condições de frequências (60 Hz, 80 Hz e 100 Hz) com três

níveis de aceleração ($0,6 \text{ m/s}^2$, $1,0 \text{ m/s}^2$, $1,6 \text{ m/s}^2$). Para cada frequência são apresentados os valores de desvios-padrão associados em cada caso, bem como os resultados obtidos durante a medição da rugosidade sem vibração.

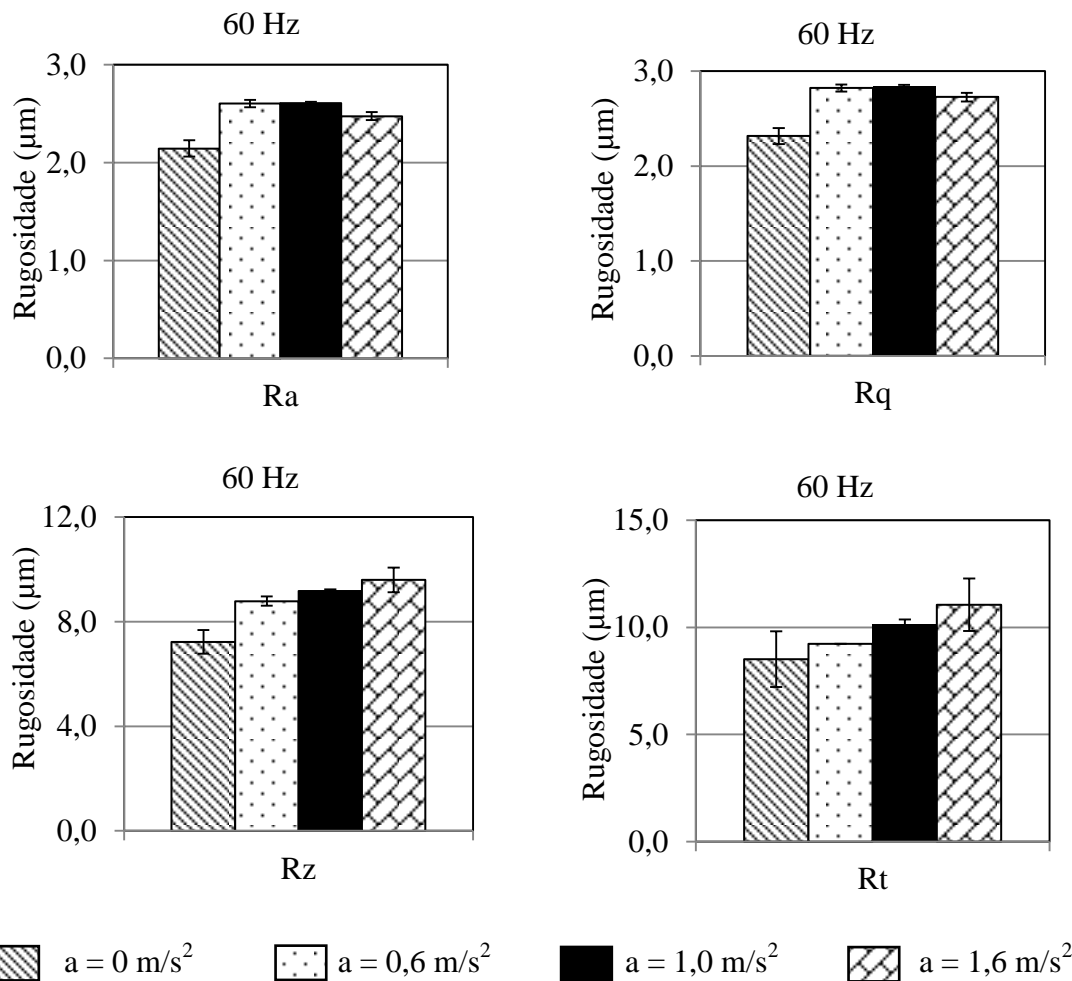


Figura 4.28. Valores de rugosidade e desvio padrão para a amostra de alumínio – 60 Hz (68,27 % de confiabilidade)

Observa-se na Fig. 4.28 que a amostra de alumínio apresenta valores de Ra , Rq , Rz e Rt de $2,144 \text{ µm}$, $2,315 \text{ µm}$, $7,227 \text{ µm}$ e $8,516 \text{ µm}$, respectivamente para a condição sem vibração. Para a frequência de 60 Hz, o aumento da aceleração não provocou alterações significativas nos valores médios dos parâmetros Ra e Rq . Entretanto, os valores observados para estas três condições são significativamente diferentes daqueles obtidos na condição sem vibração, para o Ra o crescimento foi de 13% enquanto que para o Rq foi de 15%.

Para Rz e Rt observou-se um crescimento dos valores médios destes parâmetros com o aumento da vibração do sistema, na ordem de 25% (de $a=0 \text{ m/s}^2$ para $a=1,6 \text{ m/s}^2$), confirmando os resultados obtidos nos pré-testes.

A Tabela 4.3 mostra os valores de p -valor obtidos durante a ANOVA para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 60 Hz, para a amostra de alumínio.

Tabela 4.3 Valores de p -valor obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz.

Parâmetros	p -valor	Hipótese H_0
Ra	0,406386	Aceita ($p > 0,05$)
Rq	0,519780	Aceita ($p > 0,05$)
Rz	0,047385	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,001370	Rejeita ($p < 0,05$)

Segundo a Tabela 4.3, os valores médios do parâmetro Ra e Rq não sofreram influências significativas à medida que a amplitude da vibração aumentou, ao contrario dos parâmetros Rz e Rt .

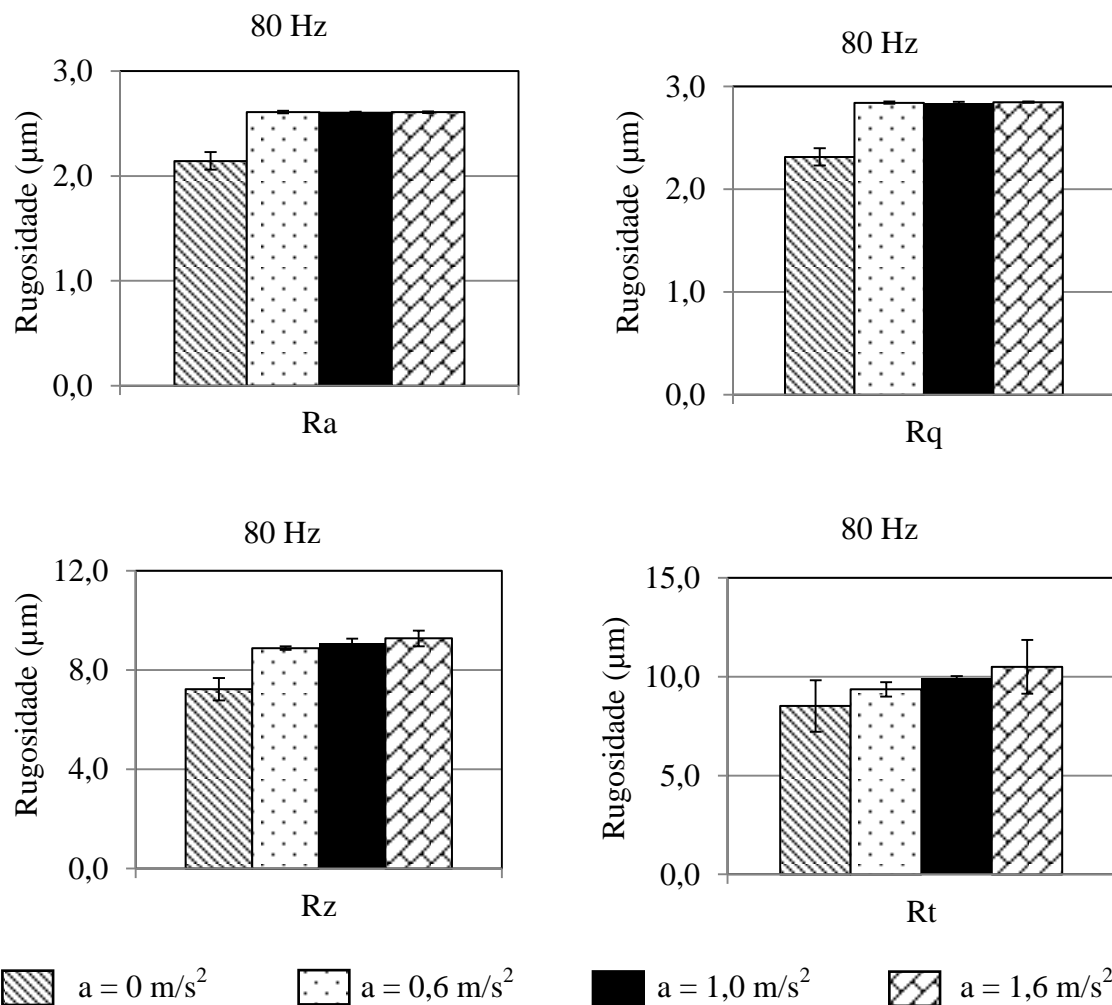


Figura 4.29 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de alumínio – 80 Hz (68,27 % de confiabilidade)

Da Figura 4.29, conclui-se que para a frequência de 80 Hz, o aumento da aceleração provocou uma variação nos valores médios dos parâmetros de rugosidade similar à observada para a frequência de 60 Hz. As diferenças observadas entre as condições com $a=0 \text{ m/s}^2$ e $a=1,6 \text{ m/s}^2$ foram de 17%, 18%, 22% e 19% para os parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt respectivamente.

A Tabela 4.4 mostra os p -valores obtidos durante a análise de variância para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 80 Hz.

Tabela 4.4. p -valores obtidos por meio de ANOVA e teste significância para 80 Hz

Parâmetro	p -valor	Hipótese H_0
Ra	0,619023	Aceita ($p>0,05$)
Rq	0,586311	Aceita ($p>0,05$)
Rz	0,383915	Aceita ($p>0,05$)
Rt	0,567695	Aceita ($p>0,05$)

Observa-se, na Tab. 4.4 que os valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt são estatisticamente diferentes, sofrendo influências dos efeitos da vibração.

Na Figura 4.30, frequência 100 Hz, observa-se que o aumento da aceleração provocou uma variação nos valores médios dos parâmetros de rugosidade similar à observada para as frequências de 60 Hz e 80 Hz. As diferenças observadas entre as condições com $a=0 \text{ m/s}^2$ e $a=1,6 \text{ m/s}^2$ foram de 15%, 16%, 20% e 11% para os parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt respectivamente.

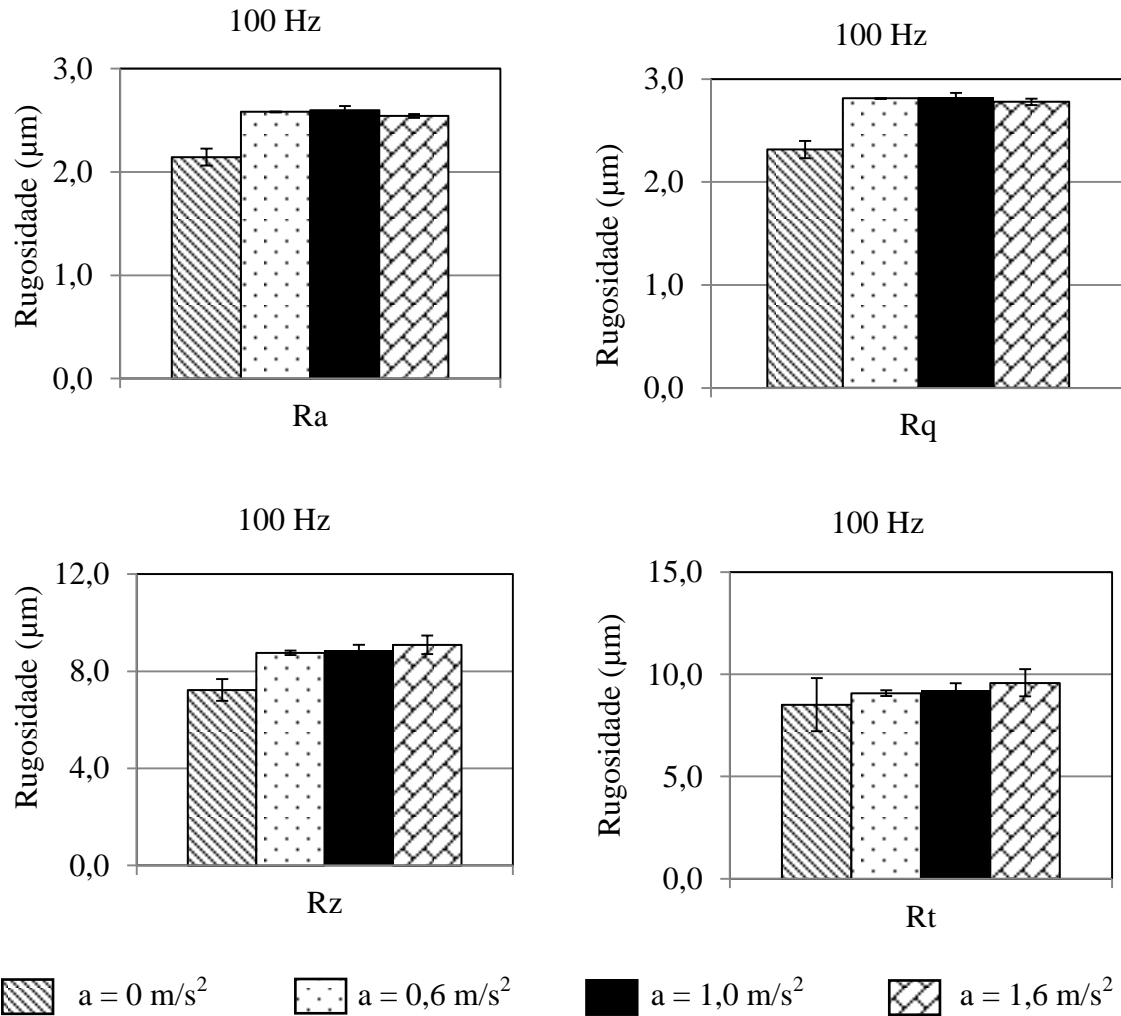


Figura 4.30. Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de alumínio – 100 Hz (68,27% de confiabilidade)

A Tabela 4.5 mostra os valores de p -valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 100 Hz.

Tabela 4.5 Valores de p -valor obtidos por meio de ANOVA e teste significância para 100 Hz

Parâmetro	p -valor	Hipótese H_0
Ra	0,625564	Aceita ($p > 0,05$)
Rq	0,612697	Aceita ($p > 0,05$)
Rz	0,075083	Aceita ($p > 0,05$)
Rt	0,000592	Rejeita ($p < 0,05$)

A partir da Tabela 4.5, conclui-se que as médias de todos os parâmetros são estatisticamente diferentes para a frequência de 100 Hz.

As Figuras 4.31 a 4.33 mostram os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade nas frequências de 60 Hz, 80 Hz e 100 Hz, respectivamente. Em todos os casos o fator de abrangência k é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95,45%.

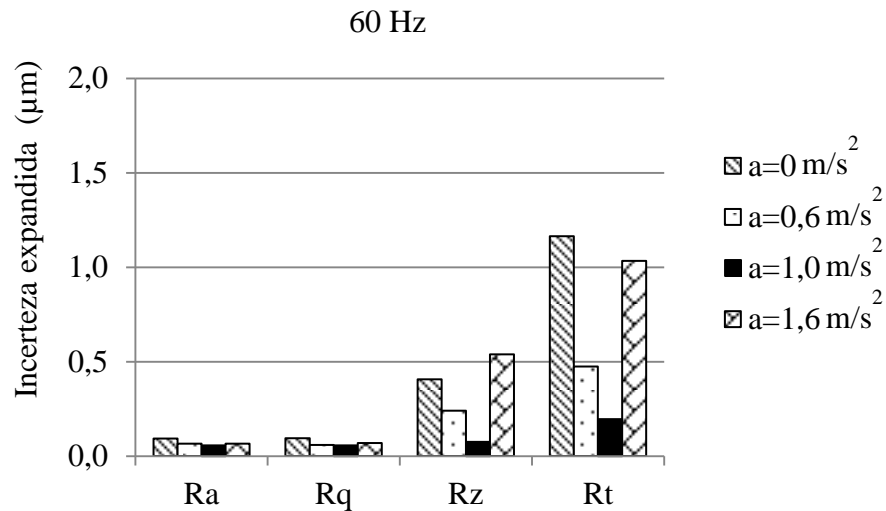


Figura 4.31. Incerteza expandida associada à medição da rugosidade da amostra de alumínio – 60 Hz

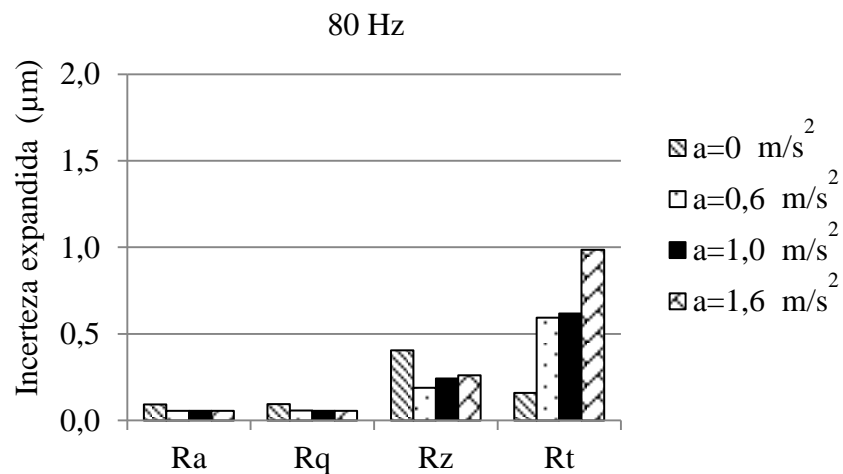


Figura 4.32. Incerteza expandida associada à medição da rugosidade da amostra de alumínio – 80 Hz.

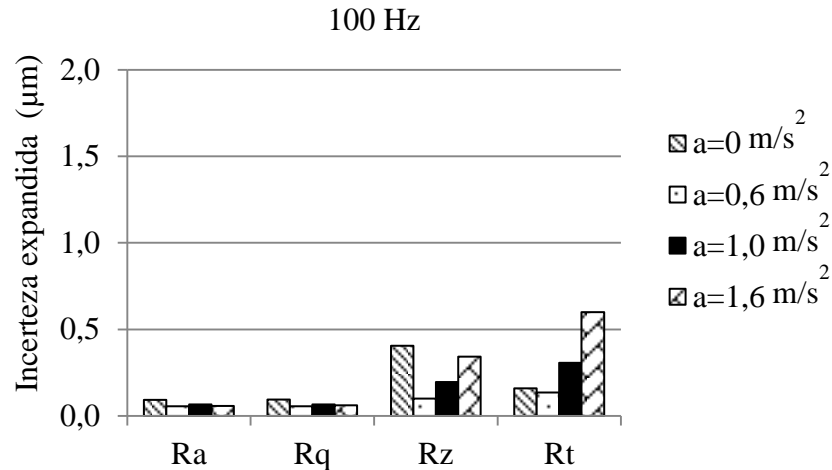


Figura 4.33. Incerteza expandida associada à medição da rugosidade da amostra de alumínio – 100 Hz.

A Figura 4.31 mostra que os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade R_a e R_q , na frequência de 60 Hz, permanecem praticamente constantes quando a aceleração aumenta. Enquanto que para R_z e R_t não apresentam uma tendência definida, muito provavelmente pela baixa repetibilidade observada nos valores indicados pelo rugosímetro. Os quais são influenciados pelos valores máximo e mínimo das ordenadas dos pontos do perfil, no comprimento de amostragem e de avaliação, respectivamente.

Para a frequência de 80 Hz (Fig. 4.32) a incerteza expandida associada à medição dos parâmetros de rugosidade manteve um comportamento similar ao observado para 60 Hz, entretanto para o parâmetro R_z não se observou uma tendência definida. Já para o parâmetro R_t observa-se uma tendência de crescimento dos valores de incerteza com o aumento da aceleração. O valor de incerteza significativamente maior observado para a aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ pode ser justificado pela sensibilidade que o parâmetro R_t tem à presença de picos e/ou vales isolados, não sendo possível relacioná-lo com o aumento da vibração.

Por fim, para a frequência de 100 Hz (Fig. 4.33) se observou que os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z apresentam um comportamento similar ao observado na frequência de 80 Hz. Para o parâmetro R_t observa-se uma tendência de crescimento dos valores de incerteza com o aumento da aceleração, sendo que para a aceleração de $0,6 \text{ m/s}^2$ a incerteza é a menor de todas. Novamente a sensibilidade deste parâmetro à presença de picos e/ou vales isolados pode contribuir para a obtenção deste resultado.

Quando comparados os valores de incerteza associados à medição de R_z e R_t para as diferentes frequências se observa uma leve redução destes de 60 Hz para 100 Hz. Muito provavelmente este fato está relacionado, também, com a não homogeneidade do acabamento superficial da amostra.

4.3.2. Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para a amostra de aço inox

As Figuras 4.34 a 4.36 mostram os valores médios de rugosidade (μm) obtidos em diferentes condições investigadas para a amostra de aço inox. São apresentados ainda os valores de desvios-padrão associados em cada caso, bem como os resultados obtidos durante a medição da rugosidade em condições sem vibração.

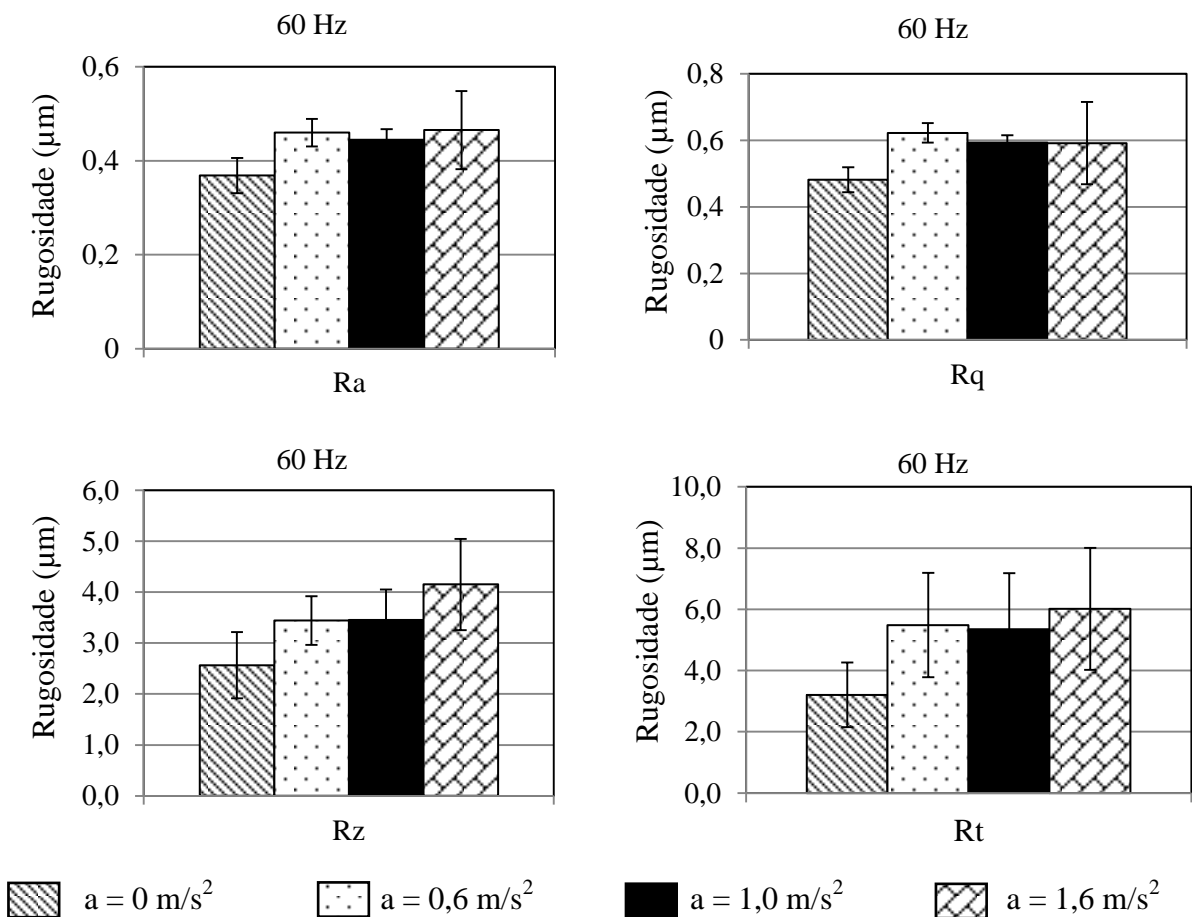


Figura 4.34 - Valores de rugosidade e desvio padrão para a amostra de aço inox – 60 Hz (68,27 % de confiabilidade)

Na Figura 4.34 observa-se que a amostra de aço inox avaliada apresenta bom acabamento superficial, sendo que os parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt assumem na condição sem vibração valores médios de 0,368 μm , 0,482 μm , 2,564 μm e 3,208 μm , respectivamente.

Na Figura 4.34, observa-se que para a frequência de 60 Hz, o aumento da aceleração provocou alterações nos valores médios dos quatro parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt . Os valores médios de Rz e Rt para as acelerações de 0,6 m/s^2 e 1,0 m/s^2 são muito similares. Muito provavelmente, nestes casos, o efeito que a presença de picos e vales isolados provoca no resultado de medição se sobrepõe ao efeito da vibração.

Com relação aos valores de desvio-padrão se observou que para as três primeiras condições de acelerações estes são similares, enquanto que para a aceleração de 1,6 m/s^2 o desvio-padrão é significativamente maior. Isto se deve provavelmente ao fato da vibração gerada no sistema ter provocado uma instabilidade no contato entre a ponta da agulha do rugosímetro e a superfície da amostra. Cabe ressaltar que para uma dada frequência à medida que a aceleração aumenta, a amplitude da vibração cresce e com isto a interferência da vibração tende a ser mais significativo.

Na Figura 4.34, constata-se também que quando comparados os valores médios dos parâmetros avaliados na ausência de aceleração e na aceleração de 1,6 m/s^2 para a frequência de 60 Hz houve um aumento de 26% para Ra , 22% para Rq , 61% para Rz e 87% para Rt , confirmando não só a tendência detectada nos pré-testes de crescimento dos valores dos parâmetros Rz e Rt com o aumento da vibração do sistema, como indicando o aumento dos valores médios de Ra e Rq .

A Tabela 4 mostra os valores de p -valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 60 Hz, para a amostra de aço inox.

Tabela 4.6 Valores de p -valor obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz.

Parâmetro	p -valor	Hipótese H_0
Ra	0,023	Rejeita ($p < 0,05$)
Rq	0,078	Aceita ($p > 0,05$)
Rz	0,011	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,020	Rejeita ($p < 0,05$)

Segundo a Tabela 4.6, os valores médios do parâmetro Rq não sofreram influências significativas na medida em que a amplitude da vibração aumentou. Por sua vez os valores médios de Ra , Rz e Rt são estatisticamente diferentes.

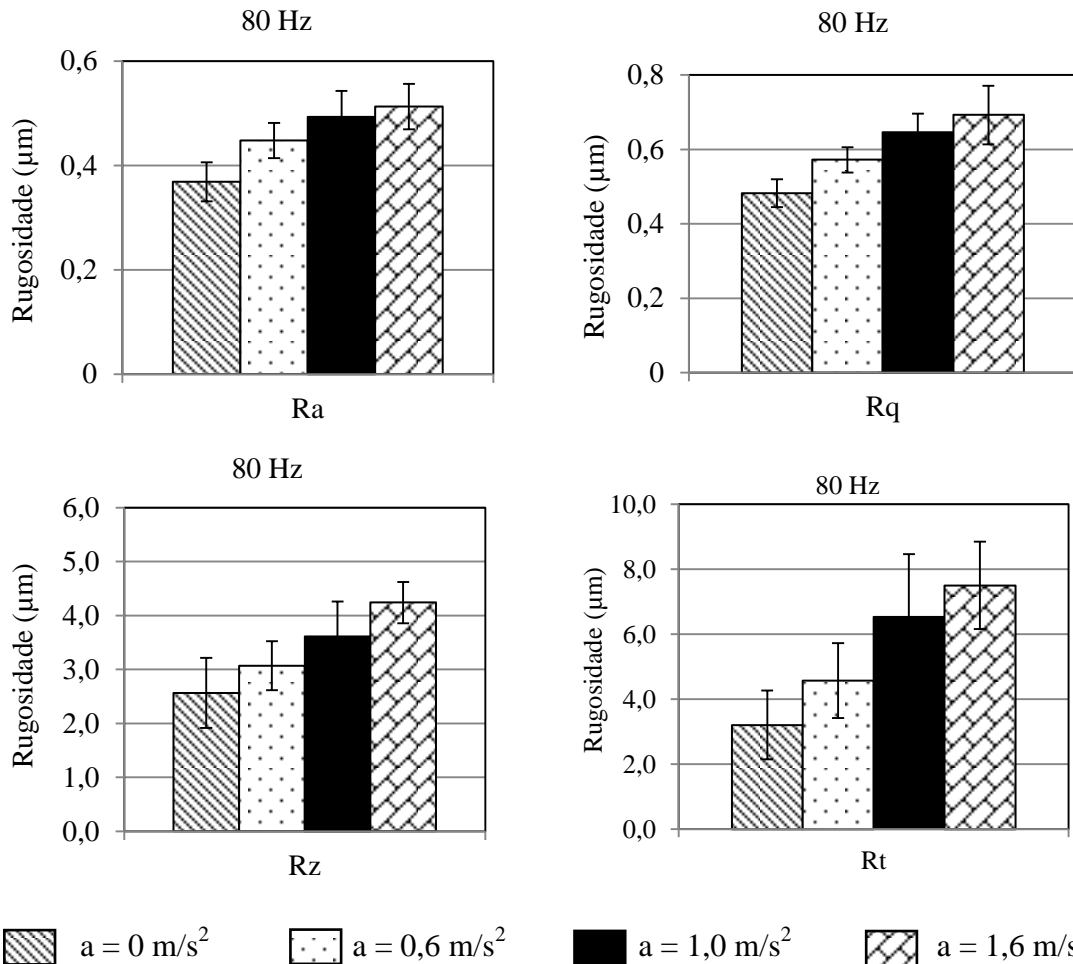


Figura 4.35 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço inox – 80 Hz (68,27 % de confiabilidade)

A partir da Fig. 4.35, observou-se que para a frequência de 80 Hz, o aumento da aceleração provocou o crescimento dos valores médios dos quatro parâmetros de rugosidade avaliados. Com relação aos valores de desvio-padrão, não se observou uma tendência definida em função do incremento de aceleração. Como esperado os parâmetros Rz e Rt sofreram as maiores alterações, sendo que a porcentagem de aumento dos valores obtidos na aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ e os encontrados na ausência de aceleração é de 39% para o Ra , 43% para o Rq , 65% para o Rz e 133% para o Rt .

A Tabela 4.7 mostra os valores de p-valor obtidos durante a ANOVA para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 80 Hz.

Tabela 4.7 Valores de p-valor obtidos por meio de ANOVA e teste significância para 80 Hz

Parâmetro	p-valor	Hipótese H0
Ra	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rq	0,002	Rejeita ($p < 0,05$)
Rz	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)

Pode-se detectar na Tab. 4.7 que os valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt são estatisticamente diferentes, sofrendo influências dos efeitos da vibração indicando que a vibração é capaz de alterar até os valores dos parâmetros de rugosidade como o Ra e Rq , que representam rugosidades médias.

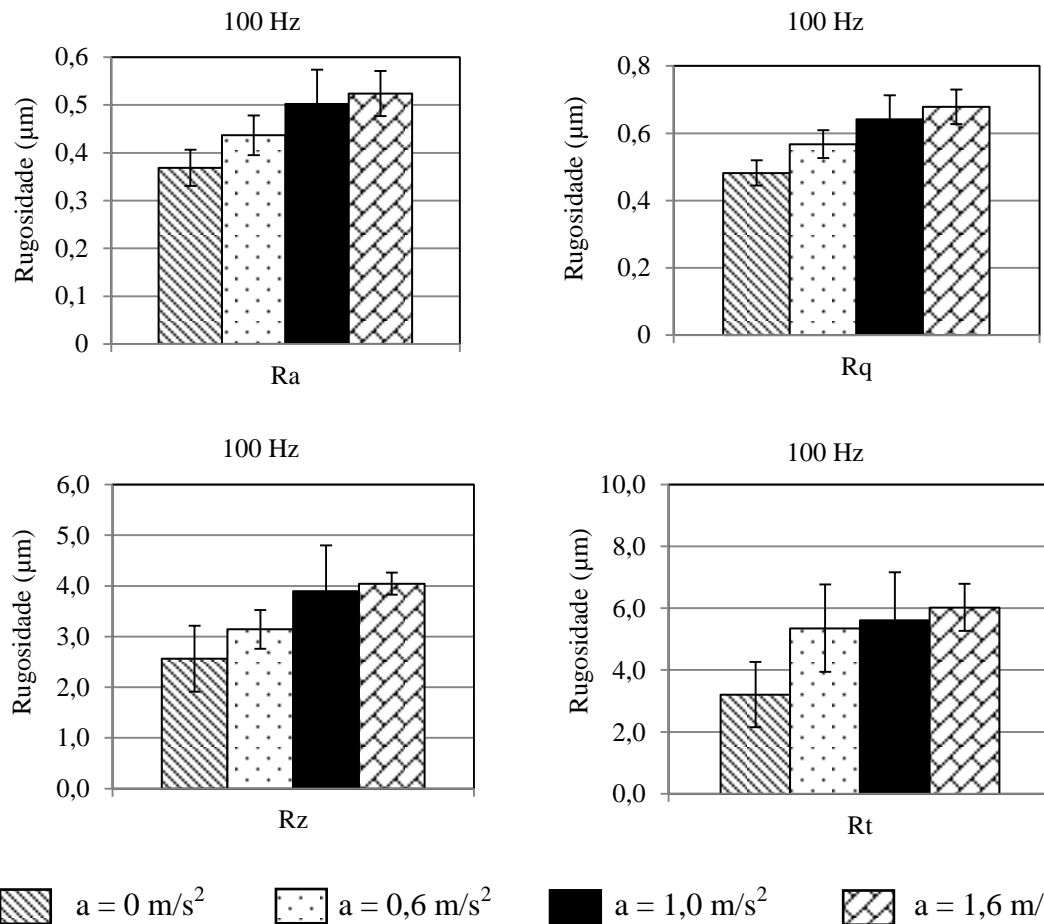


Figura 4.36. Valores de rugosidade e desvio padrão para amostra de aço inox – 100 Hz (68,27 % de confiabilidade)

Na Figura 4.36, observa-se que na medida em que a aceleração aumentou os valores médios de todos os parâmetros apresentam uma tendência crescente, sendo que a variação observada entre as condições com ausência de aceleração e com aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ foi de 42% para o Ra , 40% para o Rq , 57% para o Rz e 87% para o Rt . Nesta frequência de 100 Hz os valores de desvios-padrão não apresentam uma tendência definida

A Tabela 4.8 mostra os valores de p-valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 100 Hz.

Tabela 4.8 - Quadro Resumo de ANOVA e teste significância para 100 Hz

Parâmetro	p-valor	Hipótese H0
Ra	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rq	0,002	Rejeita ($p < 0,05$)
Rz	0,004	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,011	Rejeita ($p < 0,05$)

A partir da Tabela 4.8, conclui-se que os valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt são estatisticamente diferentes, sofrendo influências dos efeitos da vibração para a frequência de 100 Hz.

As Figuras 4.37 a 4.39 mostram os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade nas frequências de 60 Hz, 80 Hz e 100 Hz, respectivamente. Em todos os casos o fator de abrangência k é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95,45%.

A Figura 4.37 mostra que os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade Ra e Rq , na frequência de 60 Hz, permanecem praticamente constantes quando a aceleração aumenta. Enquanto que para Rz e Rt apresentam uma tendência crescente, de 27% para Rz e 47% para Rt quando comparados os valores obtidos na ausência de aceleração e a de $1,6 \text{ m/s}^2$. Isto demonstra que com o aumento da vibração a qualidade dos resultados da medição diminui significativamente.

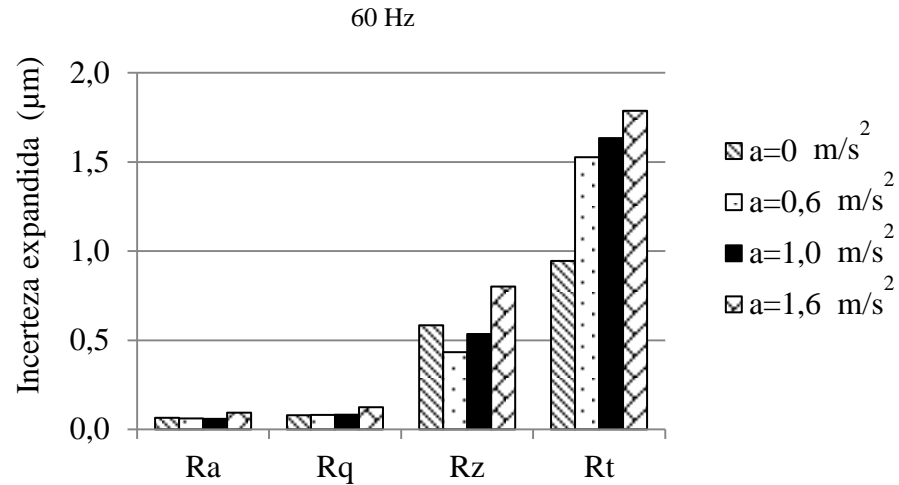


Figura 4.37. Incerteza expandida associada à medição da rugosidade da amostra de aço inox – 60 Hz

Para a frequência de 80 Hz (Fig. 4.38) a incerteza expandida associada à medição dos parâmetros de rugosidade R_a e R_q manteve o mesmo comportamento observado para 60 Hz, entretanto para os parâmetros R_z e R_t não foi observada uma tendência definida, sendo que os maiores valores foram observados para a aceleração de $1,0 \text{ m/s}^2$.

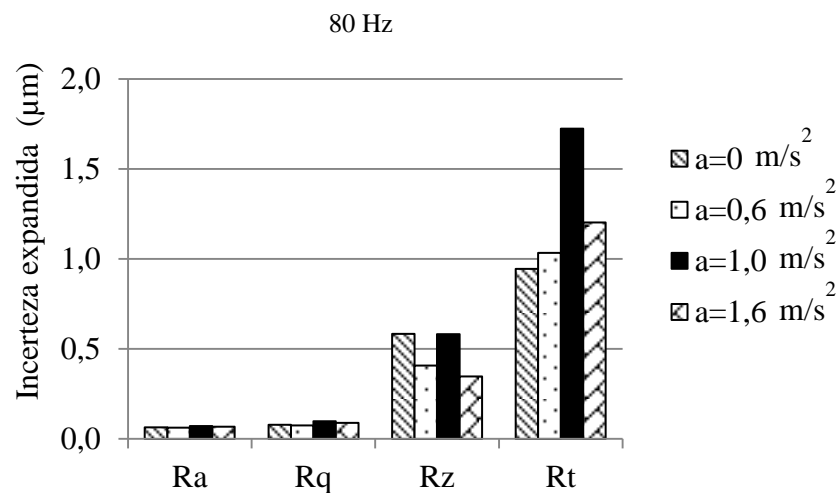


Figura 4.38 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade para a amostra de aço inox – 80 Hz.

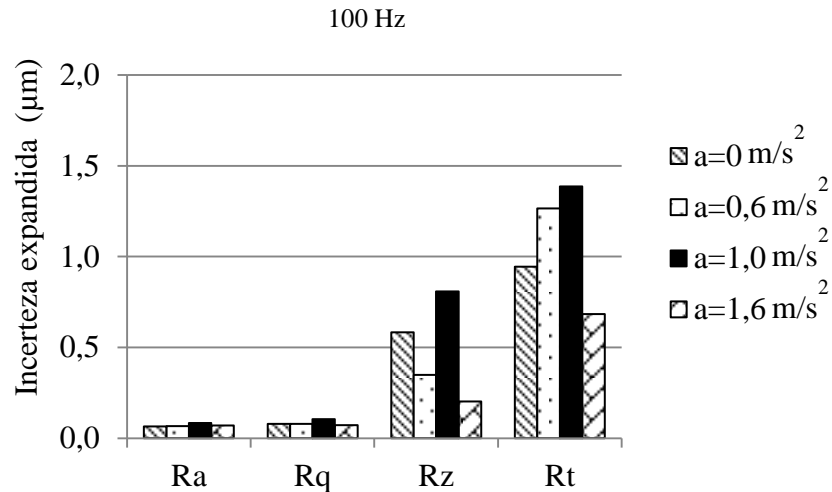


Figura 4.39 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade para a amostra de aço inox – 100 Hz.

Por fim, para a frequência de 100 Hz (Fig. 4.39) se observou que os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade apresentam um comportamento similar ao observado na frequência de 80 Hz.

4.3.3. Resultados do experimento fatorial completo 3^2 para a amostra de aço carbono

As Figuras 4.40 a 4.42 mostram os valores médios de rugosidade obtidos em diferentes condições com três níveis de frequências e três níveis de aceleração para a amostra de aço carbono. São apresentados ainda os valores de desvios-padrão associados em cada caso, bem como os resultados obtidos durante a medição da rugosidade na condição sem vibração.

Na Figura 4.40, observa-se que para a frequência de 60 Hz, o aumento da aceleração provocou aumento nos valores médios dos quatro parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt . As diferenças em porcentagem de aumento dos valores obtidos na aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ e os encontrados na ausência de aceleração é de 21% para o Ra , 22% para o Rq , 21% para o Rz e 4% para o Rt . Com relação aos valores de desvio-padrão, somente na situação de ausência de aceleração e para os parâmetros Rz e Rt tiveram um aumento significativo em relação as demais condições analisadas.

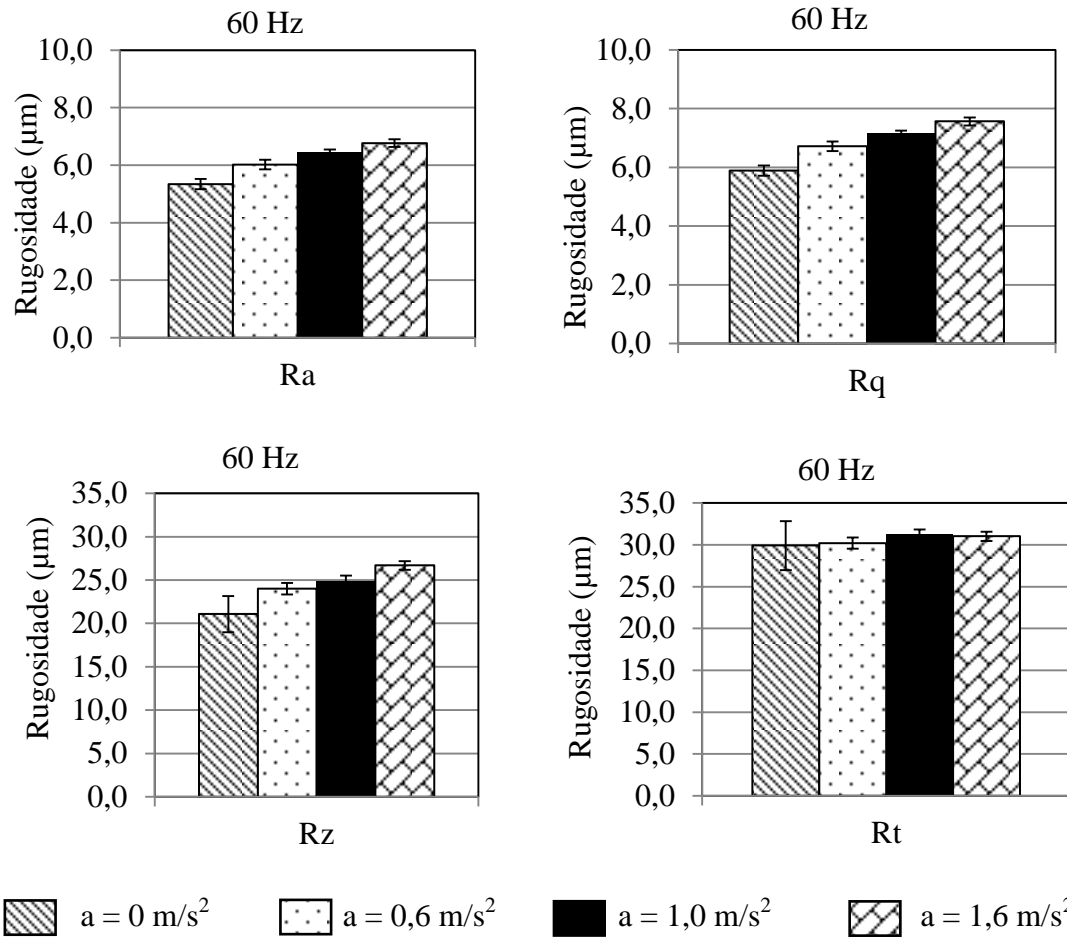


Figura 4.40. Valores de rugosidade e desvio padrão para a amostra de aço carbono – 60 Hz (68,27 % de confiabilidade)

A Tabela 4.9 mostra os valores de p -valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 60 Hz, para a amostra de aço carbono.

Tabela 4.9 Valores de p -valor obtidos por meio da ANOVA e teste significância para 60 Hz.

Parâmetro	p-valor	Hipótese H0
R_a	0,028	Rejeita ($p < 0,05$)
R_q	0,048	Rejeita ($p < 0,05$)
R_z	0,022	Rejeita ($p < 0,05$)
R_t	0,029	Rejeita ($p < 0,05$)

Observa-se, na Tab. 4.9 que os valores médios dos parâmetros R_a , R_q , R_z e R_t são estatisticamente diferentes, sofrendo influências dos efeitos da vibração.

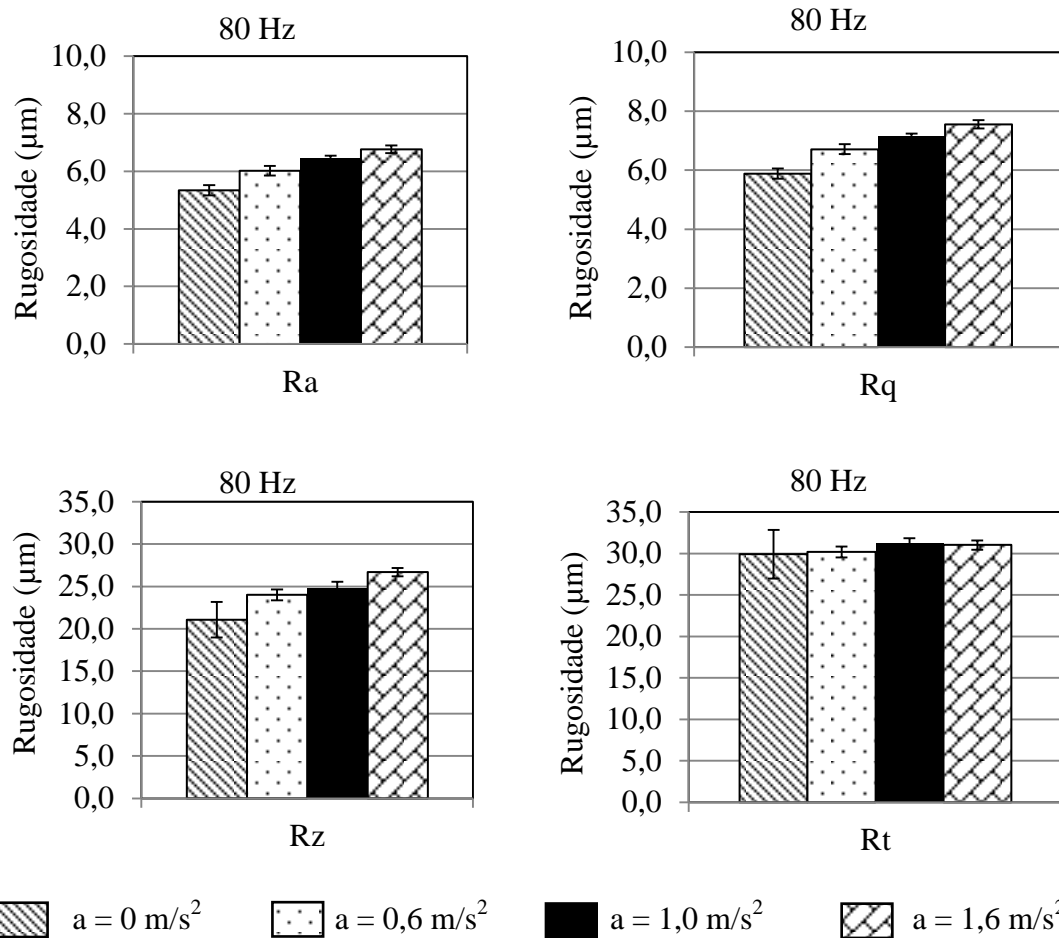


Figura 4.41 - Valores de rugosidade e desvio padrão da amostra de aço carbono – 80 Hz (68,27 % de confiabilidade)

A partir da Fig. 4.41 conclui-se que para a frequência de 80 Hz, o aumento da aceleração influenciou os valores médios dos parâmetros R_a , R_q e R_z . Por sua vez, o parâmetro R_t mostrou uma tendência crescente até a aceleração de $1,0 \text{ m/s}^2$, já na aceleração de $1,6 \text{ m/s}^2$ experimentou um leve decréscimo. Isto talvez possa ser explicado pelos mesmos motivos já analisados nas outras duas amostras de alumínio e aço inox. Com relação aos valores de desvio-padrão, observa-se que os parâmetros R_z e R_t exibem os maiores valores, muito provavelmente devido à presença de picos e vales isolados.

A Tabela 4.10 mostra os valores de p-valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 80 Hz.

Observa-se, na Tab. 4.10 que os valores médios dos parâmetros R_a , R_q , R_z e R_t são estatisticamente diferentes, sofrendo influências dos efeitos da vibração.

Tabela 4.10 - Valores de p-valor obtidos na ANOVA e teste significância para 80 Hz

Parâmetro	p-valor	Hipótese H0
Ra	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rq	0,002	Rejeita ($p < 0,05$)
Rz	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)

Na Figura 4.42, frequência de 100 Hz, observa-se que na medida em que a aceleração aumentou os valores médios de todos os parâmetros apresentam uma tendência crescente. Nesta frequência os valores de desvios-padrão não apresentam uma tendência definida.

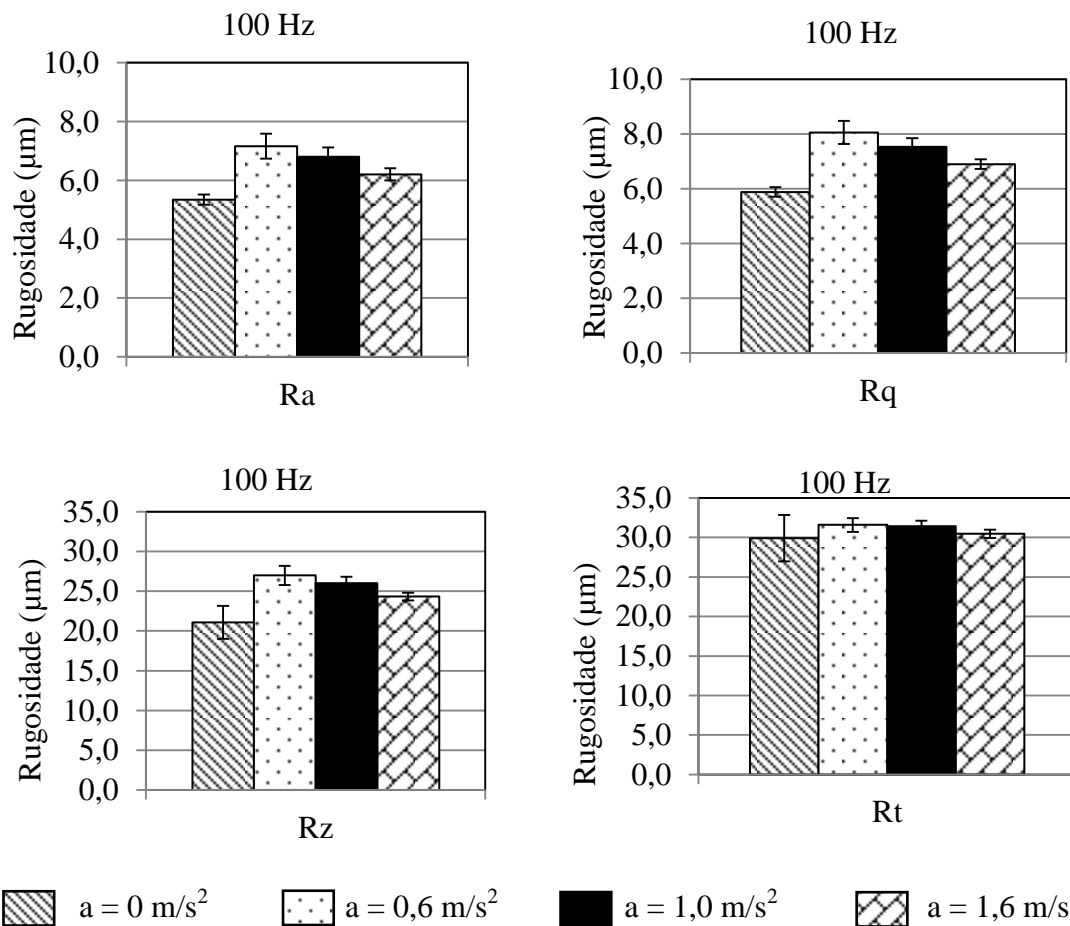


Figura 4.42 - Valores de rugosidade e desvio padrão para amostra de aço carbono – 100 Hz (68,27 % de confiabilidade)

A Tabela 4.11 mostra os valores de p-valor obtidos durante a análise de variância (ANOVA) para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados na frequência de 100 Hz.

Tabela 4.11 - Quadro Resumo de ANOVA e teste significância para 100 Hz

Parâmetro	p-valor	Hipótese H0
Ra	0,001	Rejeita ($p < 0,05$)
Rq	0,002	Rejeita ($p < 0,05$)
Rz	0,004	Rejeita ($p < 0,05$)
Rt	0,011	Rejeita ($p < 0,05$)

A partir da Tabela 4.11, conclui-se que as médias de todos os parâmetros são estatisticamente diferentes para a frequência de 100 Hz, sofrendo influências dos efeitos da vibração.

As Figuras 4.43 a 4.45 mostram os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade nas frequências de 60 Hz, 80 Hz e 100 Hz, respectivamente para a amostra de aço carbono. A incerteza expandida declarada possui probabilidade de abrangência de 95,45% para um fator de abrangência k é igual a 2,00.

A Figura 4.43 mostra que os valores de incerteza expandida associados à medição dos parâmetros de rugosidade Ra e Rq , na frequência de 60 Hz, apresentam um leve crescimento na medida em que a aceleração aumenta.

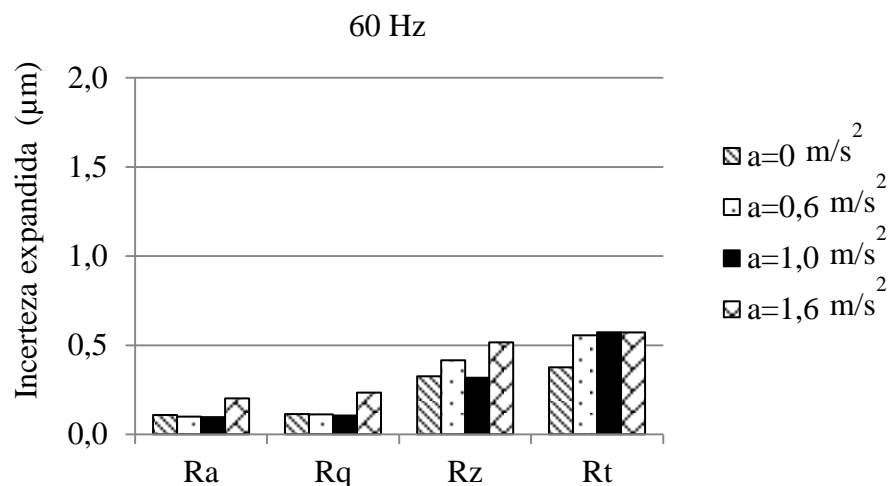


Figura 4.43 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 60 Hz

Para a frequência de 80 Hz (Fig. 4.44) a incerteza expandida associada à medição dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rz e Rt manteve um comportamento similar ao observado para 60 Hz.

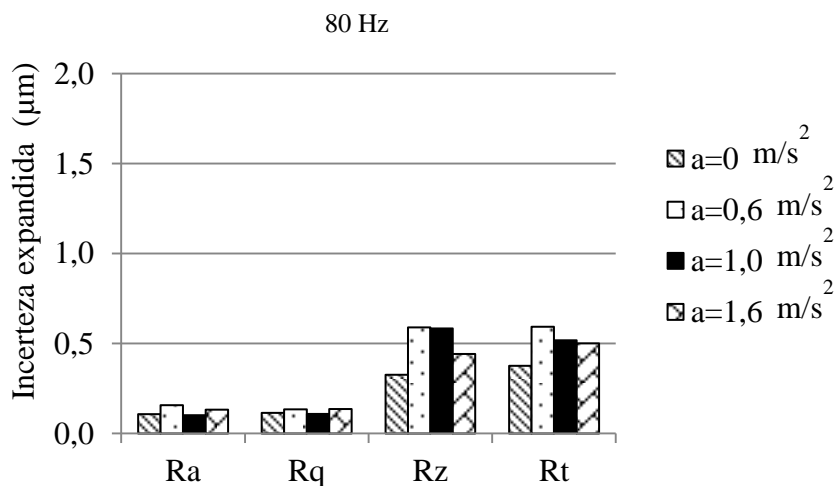


Figura 4.44 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 80 Hz.

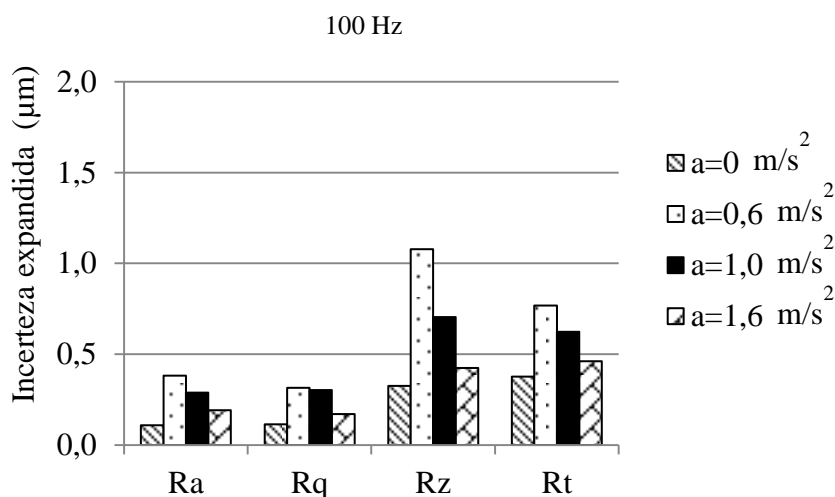


Figura 4.45 - Incerteza expandida associada à medição da rugosidade – 100 Hz.

Por fim, para a frequência de 100 Hz (Fig. 4.45) se observou um aumento dos valores de incerteza expandida em comparação com os valores obtidos nas frequências de 60 Hz e 80 Hz. Observa-se, ainda uma tendência decrescente dos valores de incerteza quando a aceleração aumenta de $0,6 \text{ m/s}^2$ para $1,6 \text{ m/s}^2$.

4.3.4 Comparação dos resultados do experimento fatorial 3²

As Figuras 4.46 a 4.48 mostram os valores de rugosidade obtidos para as amostras de alumínio (AL), aço inox (AI) e aço carbono (AC), respectivamente.

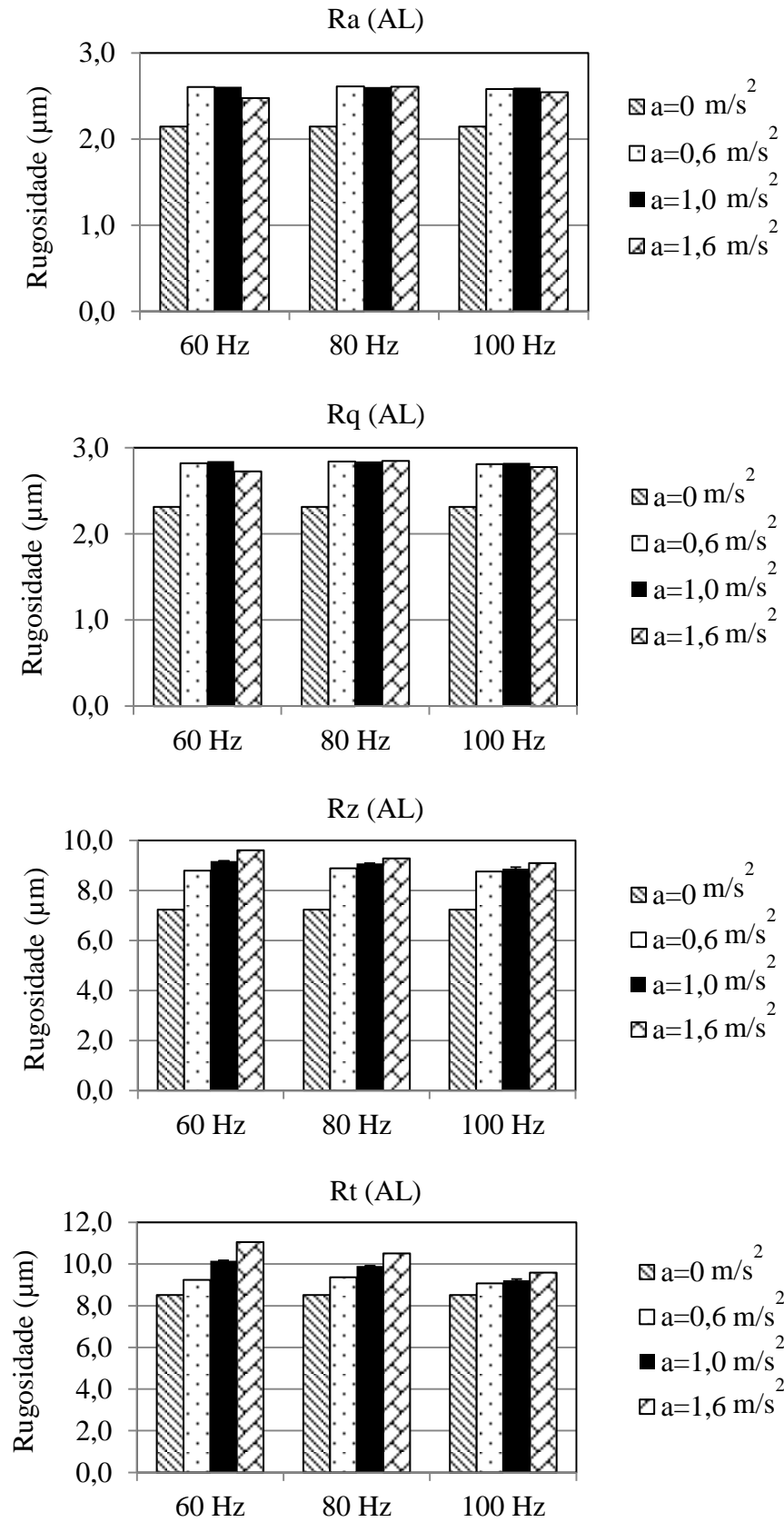


Figura 4.46. Valores de rugosidade da amostra de alumínio para as diferentes frequências e acelerações

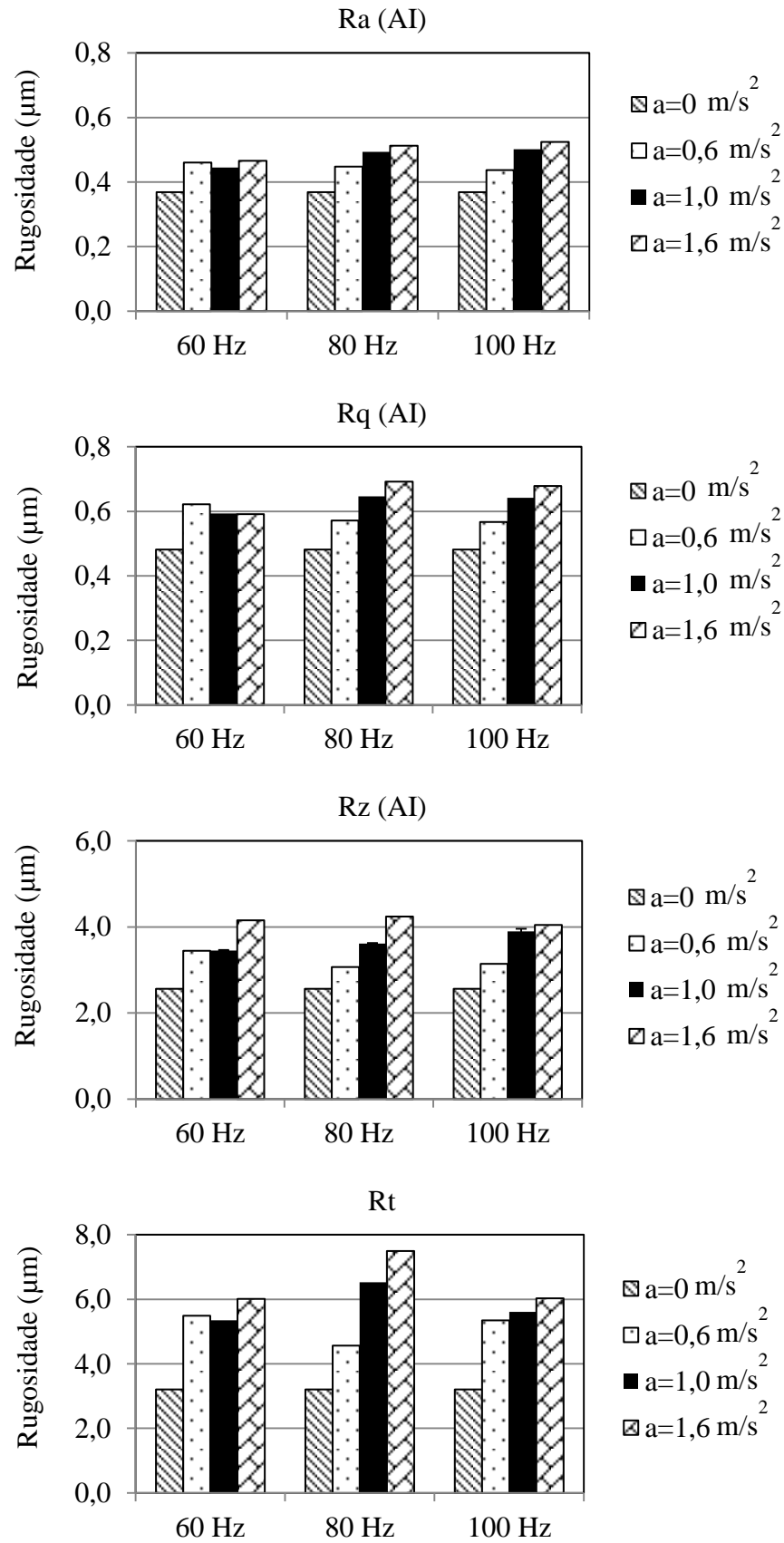


Figura 4.47. Valores de rugosidade da amostra de aço inox para as diferentes frequências e acelerações

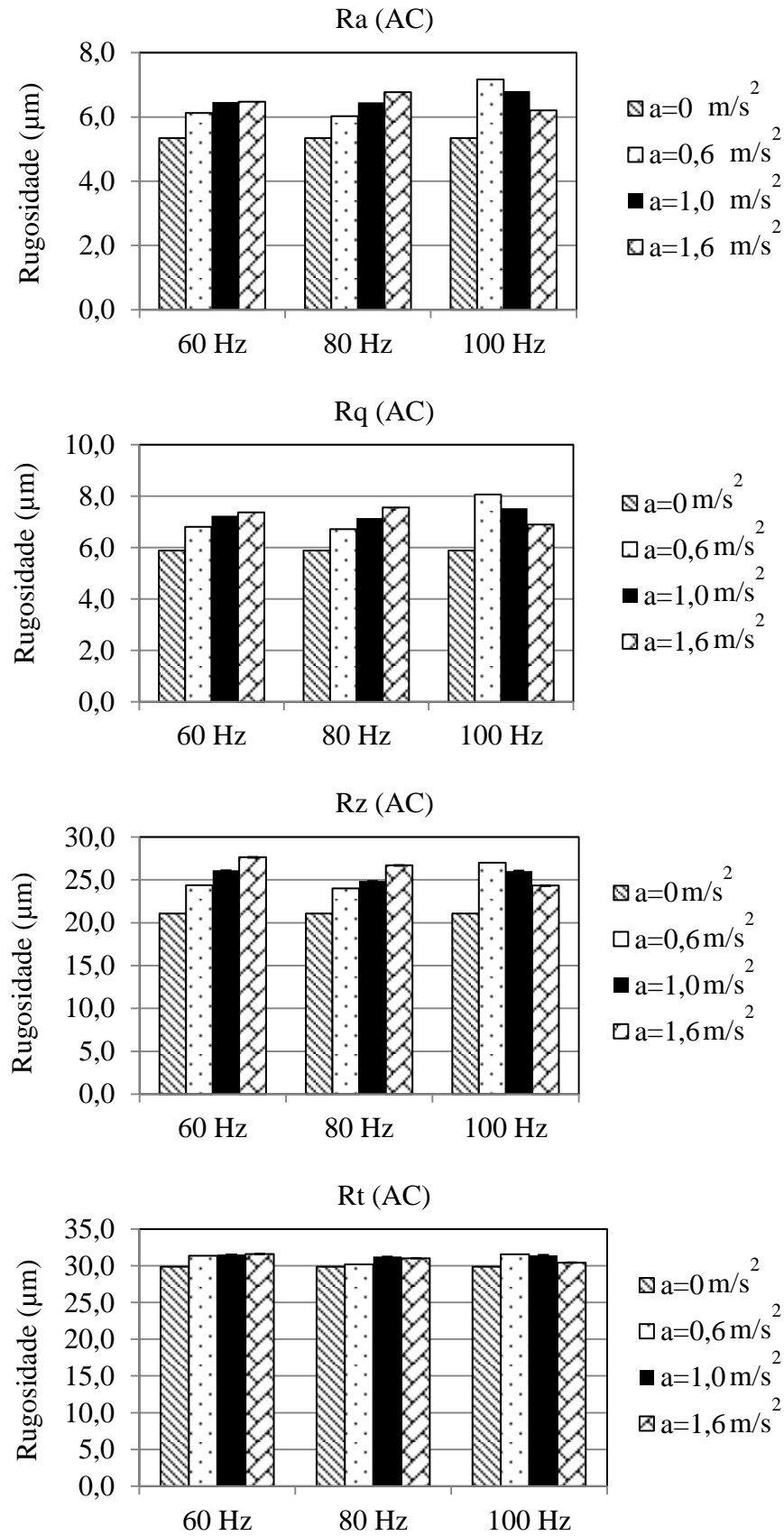


Figura 4.48. Valores de rugosidade da amostra de aço carbono para as diferentes frequências e acelerações

Na Figura 4.46 observa-se que os parâmetro Ra , Rq e Rz obtidos durante a avaliação da amostra de alumínio para uma mesma aceleração permanece praticamente invariável em função da frequência, já o Rt apresenta uma tendência decrescente com o aumento da frequência.

Os valores médios de todos os parâmetros aumentaram independente da frequência ao saírem da condição de aceleração nula para condições com valores maiores de aceleração. Sendo que para os parâmetros Ra e Rq não apresentaram uma relação de crescimento direta com o aumento da aceleração, ao contrario dos parâmetros Rz e Rt que mostraram uma correlação positiva com tendência aproximadamente linear.

Na Figura 4.47 observa-se que os valores médios dos parâmetros de rugosidade avaliados aumentaram na medida em que a aceleração cresceu, mostrando uma tendência de proporcionalidade direta entre ambas, rugosidade e aceleração.

Na Figura 4.48 observa-se que os valores médios dos parâmetros Ra , Rq e Rz para as frequências de 60 Hz e 80 Hz aumentam com o incremento da aceleração, já na frequência de 100 Hz invertem esta relação, ou seja, diminuem com o aumento da aceleração. Ainda todos os parâmetros independentes da frequência aumentaram ao sair da condição de aceleração nula.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Finalizando o presente trabalho as seguintes conclusões podem ser formuladas:

- O procedimento experimental proposto permitiu verificar que a vibração mecânica constitui uma fonte significativa de erro no processo de medição da rugosidade por contato, por meio do rugosímetro eletromecânico TR200 - HOMIS em amostras de alumínio, aço inox e aço carbono. O efeito da vibração influenciou não só os valores médios dos quatro parâmetros de amplitude avaliados: Ra -desvio aritmético médio do perfil avaliado, Rq -desvio médio quadrático do perfil avaliado, Rz -altura máxima do perfil e Rt -altura total do perfil, mas também os valores de incerteza associados à medição. Desta forma destaca-se a importância de medir a rugosidade em ambientes livres de vibração mecânica, caso contrário cuidados devem ser tomados para mitigar seus efeitos.
- Durante a realização dos pré-testes foi possível identificar a frequência dos sinais das ondas vibratórias com maior energia dentro da banda de 50 Hz a 150 Hz.
- No pré-teste observou-se também que os valores dos parâmetros que representam rugosidades médias (Ra e Rq) na amostra de alumínio e os valores de incerteza associados às medições ficaram praticamente invariáveis com o aumento da aceleração (amplitude de vibração) na banda de frequência de 50 Hz a 150 Hz. Porém, os valores médios de Rz e Rt coletados nas mesmas condições de aumento de aceleração, bem como as incertezas associadas, apresentaram variações significativas que foram confirmadas no planejamento

fatorial completo 3^2 para a amostra de alumínio nas três frequências e três acelerações avaliadas.

- Para a amostra do aço inox observou-se uma diferença em relação ao pré-teste, pois ainda que os valores médios de R_z e R_t tenham aumentado com a aceleração, os valores de R_a e R_q só aumentaram com o incremento da aceleração nas frequências de 80 Hz e 100 Hz, permanecendo praticamente constantes na frequência de 60 Hz.
- Para a amostra de aço carbono observou-se que os valores médios dos parâmetros R_a , R_q , R_z e R_t para as frequências de 60 Hz e 80 Hz aumentaram com o incremento da aceleração, já na frequência de 100 Hz invertem esta relação, ou seja, diminuem com o incremento da aceleração, provavelmente nesta frequência de 100 Hz o sistema interno de análise e conversão de sinal do rugosímetro sofre influências específicas da vibração mecânica.
- Dentro do espectro de frequências de 50 Hz a 150 Hz, independente das frequências e materiais das amostras adotados, o que significativamente influencia os resultados das medições de rugosidade por contato é a amplitude da vibração medida em aceleração.
- O efeito que a vibração mecânica produz no valor do R_t foi menos significativo que a variabilidade dos valores fornecidos pelo rugosímetro. Este parâmetro ao ser determinado como a altura entre as ordenadas do pico mais alto e do vale mais profundo, no comprimento de avaliação, é fortemente influenciado pela presença de picos e/ou vales isolados.
- Os valores de rugosidade obtidos na medição sem contato foram significativamente maiores para as três amostras avaliadas. As diferenças observadas variaram entre 20% (R_q da amostra de aço inox) e 87% (R_z da amostra de aço carbono). Estas diferenças podem ser atribuídas a: impossibilidade da agulha do rugosímetro acessar os vales mais estreitos; deformação provocada pela agulha na amostra durante a medição e defeitos presentes na superfície da peça e não detectados pela agulha.
- A utilização do Método de Monte Carlo e do programa Statistic 7 demonstraram eficiência, o primeiro na simplicidade no cálculo iterativo das incertezas de medição e o segundo na agilidade na análise da variância permitindo avaliar a significância dos valores médios dos parâmetros de rugosidade nas diferentes condições de vibração.

- Embora a literatura estudada (Leach, 2001; Zahwi *et al.*, 2003; ABNT NBR ISO 3274, 2008 e Lyncée Tec, 2012) destaque a importância de medir a rugosidade em ambientes livres de vibração mecânica, não foram encontrados trabalhos que quantifiquem seus efeitos. Desta forma, este trabalho apresenta de forma pioneira a quantificação do efeito que a vibração mecânica produz nos valores médios dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_t), bem como na incerteza associada à medição.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir destas observações e conclusões, algumas propostas de trabalhos futuros estão delineadas a seguir.

- Estudar se a vibração mecânica durante o processo de medição da rugosidade tem relação ou dependência com os processos de fabricação e tipo de material analisado;
- Verificar se a vibração pode afetar na força de contato do apalpador com a superfície da amostra causando interferência no processo de medição, contribuindo assim na incerteza final de medição.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 1977. 295p.

AMORIM, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Metal Duro**. 2002. 131p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ARENCIBIA R.V. FRANCO, S.D., DE MORAES, J.O. **Relatório de medição dos penetradores**. 2011. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 3274, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Características nominais de instrumentos por contato (pontas de apalpação)**. 2008. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Set. 2002. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 4288, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. 2008. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 80000-1. **Grandezas e Unidades Parte 1: Generalidades**. 2011. 46p.

BARBARINI, F.; NAT URESA, J.S.; GONÇALVES, L.; VON, R., **Vibrações e acelerômetros**, Novembro 2007, UNICAMP, 37p.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Sharter 2 Surface roughness analysis and measurement techniques (2002). pp. 49-120.

CHAND, M.; MEHTA, A.; SHARMA, R.; OJHA, V.N.; CHAUDHARY, K.P. Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument – A comparative study. **Indian journal of pure & applied physics**, V. 49, 2011, pp. 335-339.

COSTA, M. V. A. **Avaliação da Incerteza de Medição da Rugosidade Utilizando o Método de Monte Carlo**. 2012. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

COX, M.; HARRIS, P. The GUM and its planned supplemental guides, **Accred Qual Assur** 8(4). 2003. pp. 375–379.

DROZDA, T. J.; WICK, C., **Toll and manufacturing engineers handbook**, Fourth edition, V. 1: Machining, Dearborn, MI. Society of Manufacturing engineers, 1983.

FACCIO, I. **Investigações sobre o Acabamento Superficial de Usinagens com Altíssima Velocidade de Corte**. 2002. 137p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERNANDES J. C. **Segurança nas Vibrações sobre o corpo humano**. Apostila. 2000. 11p.

FIGUEIREDO, L. J.; GATANIZ, A. R.; LOPES, G.S.; PEREIRA, R. **Aplicações de acelerômetros**, Monografia, IAS, Lisboa, Portugal, 2007, 12p.

INMETRO, **A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo**. INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO. Nota técnica, 2008. 34p.

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

ISO R 1683 Acoustics - **Preferred reference values for acoustical and vibratory levels**. 3p. 2008.

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

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 101 - **Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method**, 2008. 90p.

JANG, D. Y., CHO, Y., KIM, H. G., HSIA, A. **Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hand turning**. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 36, No. 4, 1996.

JUNEJA, B. L.; SWKHON, G. S. **Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools**, John Wiley & Sons, New Delhi, Índia, 1987, 462p.

JUNQUEIRA, K. de C.; PAMPLONA, E. de O. Utilização da Simulação de Monte Carlo em Estudo de Viabilidade Econômica para a Instalação de um Conjunto de Rebeneficiamento de Café na Cocarive. **XXII Encontro Nacional de engenharia de Produção**, outubro de 2002, Curitiba, PR. Brasil.

LEACH R. **The measurement of surface texture using stylus instruments**. Measurement Good Practice Guide No. 37 National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, (2001) 97p.

LEAL, J.E.S. **Avaliação da Incerteza em Processos Complexos de Medição Utilizando o Método de Monte Carlo**. 2013. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LINK W. **Metrologia mecânica. Expressão da incerteza de medição**. 1ª edição. Editorial MITUTOYO Sul América Ltda. Brasil. 1997.

LYNCÉE TEC, **Roughness measurements with Digital Holographic Microscopy**. Disponível em <http://www.lynceetec.com/downloads/>. November de 2012.

MONTGOMERY, D.C., **Design and analysis of experiments**, Fourth ED., Wiley, New York. 2001.

NETO, B. de B., SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 2ª Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. Ed. Edgard Blücher LTDA. São Paulo. Brasil. 1994. 119p.

NUNES, L. T. **Análise Estatística da Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade no Torneamento do Aço Microligado DIN 38MNSIVS5**. 2011. 143p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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. STERNADT, G.H., ARENCIBIA, V.R. Removing deep valleys in roughness measurement of soft and natural materials with mathematical filtering. **Ciência & Engenharia**, v. 21, n. 2, p. 29 – 34, 2012.

PIRATELLI-FILHO, A.; **Rugosidade superficial**. Palestra. 3 Seminário de metrologia. FEMEC-UFU. 16 1 18 de maio de 2011. 41p. Disponível em <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/?op=sobre>.

POON, C.Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. **Wear**, 190, 1995, pp. 76-88.

POTENCIANO, M.C. **An Analysis on Vibration influences on roughness measurements**. 2013. 93 f. Final Paper, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PCB PIEZOTRONICS, **Accelerometer**, Catálogo. 1p. Disponível em http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Specsheets/352C33_H.pdf. 10/12/2013.

REGAZZI, R. D.; XIMENES, G. M. (2005) **A Importância da Avaliação da Vibração no Corpo Humano**. IMETRO. Rio de Janeiro, Brasil.

RIPPER, G. P., DIAS, R. S.; GARCIA, G. A. **A importância da calibração de acelerômetros para a indústria automobilística**, DIAVI – Divisão de metrologia em acústica e vibrações/LAVIB – Laboratório de vibrações, Duque de Caxias, RJ, 2006, Trabalho do INMETRO, 15p.

SANTOS, A. F. M., **Caracterização de um sistema de medição de vibração de baixo custo para aplicações gerais**. 152 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG. 2011.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**, Oxford science publication, NEW YORK, 1984, 594p.

SCHAFFER, G. H. The many Faces of Surface Texture, **American Machinist and Automated Manufacturing**, 1988. pp. 61-68. 110.

SÓBOL, I.M. **Método de Monte Carlo**. Lecciones populares de matemáticas. Editorial MIR. Moscú. p.77. 1976.

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

VALDÉS, R.A. **Estimativa da Incerteza de Medição usando o Método de Monte Carlo**. (Relatório de Pós doutorado). DEF/FEM/UNICAMP, Campinas – SP, 2006.

VALDÉS, R. A.; NOVASKI, O.; SATO, DENISE P. V., Estimativa de incerteza usando o Método de Monte Carlo. In: **Metrologia2009**, Salvador. 2009. p. 1-8.

ZAHWI, S.; KOURA, M.; MEKAWI, A. Factors influencing uncertainty evaluation for surface roughness measurements. In Proceedings **XVII IMEKO World Congress**, June 22 – 27, 2003.

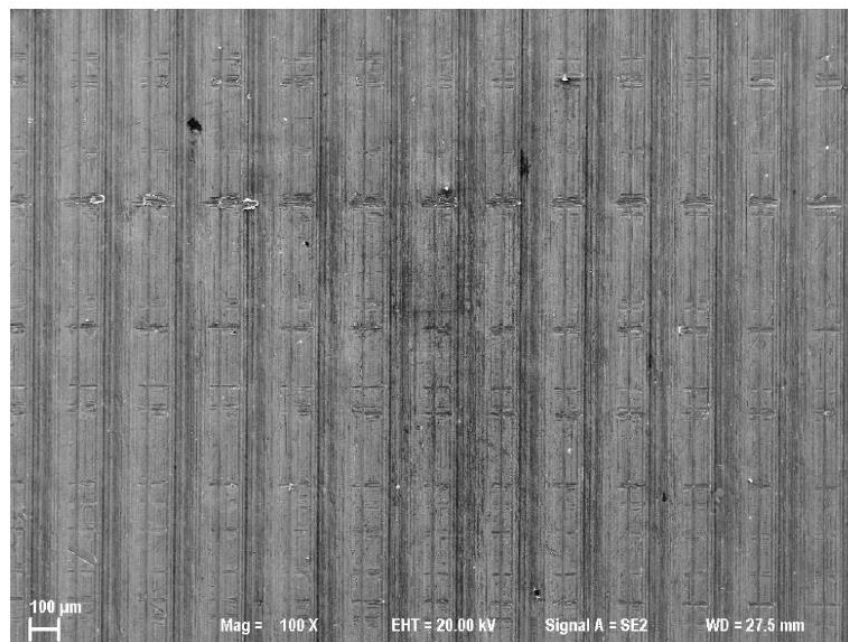
APÊNDICES

APÊNDICE 1. Imagens obtidas no MEV da amostra de alumínio

APÊNDICE 1

IMAGENS OBTIDAS NO MEV DA PEÇA DE ALUMÍNIO

As Figuras A1.1 a A1.3 mostram as imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de varredura (MEV) na peça de alumínio após o processo de medição da rugosidade.



Figuras A1.1 - Imagem da superfície da peça de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 100 µm)

Na Figura A1.1 são evidenciados os sulcos deixados pela ferramenta da plaina durante a usinagem (sulcos verticais) e riscos impressos na superfície pela agulha do rugosímetro (com diâmetro de 2 µm) no sentido horizontal. Nas Figuras A1.2 e A1.3 essas deformações são ampliadas.

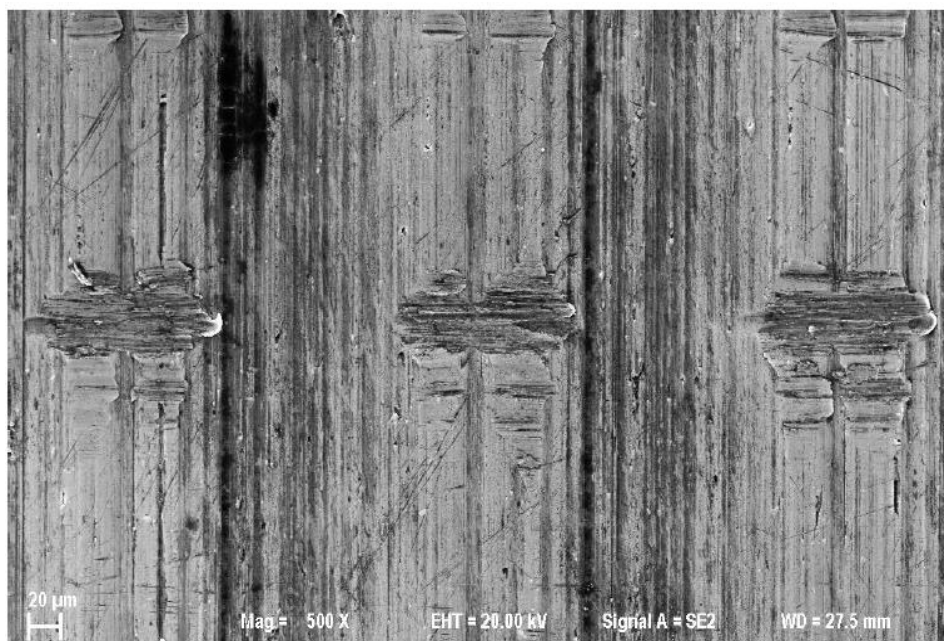


Figura A1.2. Imagem da peça de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 20 µm)

Observa-se nas Figs. A1.2 e A1.3 a existência de vários riscos deixados pela agulha de diamante. Fica evidenciado que a superfície da peça sofreu danos (deformação) decorrentes do processo de medição por contato.

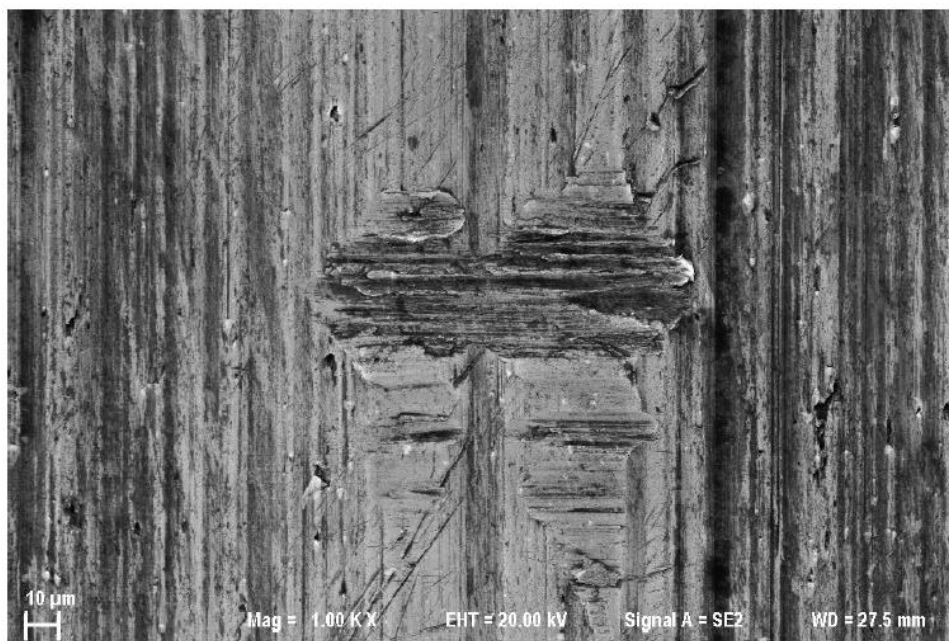



Figura A1.3. Imagem da peça de alumínio obtida no MEV após a medição da rugosidade (escala 10 µm)

ANEXOS

ANEXO 1. Certificado de calibração do rugosímetro

ANEXO 2. Certificado de calibração do termo-higrômetro

ANEXO 3. Certificado de calibração do acelerômetro

 LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 20/03/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 2
Certificado de Calibração: CCA-010/2012		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: Laboratório de Metrologia Dimensional

Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121

Telefone: (34) 3239-4584

E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

Instrumento: Rugosímetro digital

Tipo: portátil

Fabricante: Homis modelo TIME TR200

Faixa de medição: 160 mm

Resolução: 0,001 μm

Identificação: Não consta

Última calibração: Não consta

3. Calibração

Ordem do serviço: 010/2012

Data do pedido: 10/03/2012

Data da calibração: 19/03/2012

4. Procedimento

Inicialmente foi realizada a análise visual tanto do instrumento quanto do padrão de rugosidade e não foi notada nenhuma anomalia. O rugosímetro funciona de forma adequada e o padrão se encontra em bom estado de conservação, sem a presença de risco e defeitos aparentes.

O padrão de rugosidade é dividido em duas partes, (R_a igual a 0,38 μm e R_a igual a 2,94 μm). A calibração foi efetuada com o padrão com R_a igual a 0,38 μm . Foram efetuadas oito medições utilizando um cut-off (l_r) = 0,08 mm.

5. Condições ambientais

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

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade

Fabricante: Mitutoyo


Código: 178-604

Número de série: 001031008

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

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.

Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

	Data: 20/03/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 2
Certificado de Calibração: CCA-010/2012		

Número do Certificado de Calibração: 15218/11

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

Tipo: Termo-higrômetro digital

Resolução: 0,1 °C

Faixa nominal: (-20 a 60)°C

Número do certificado de calibração: N. R4996/13 (Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação)

Incerteza expandida: 0,3 °C para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade.

7. Resultados da calibração

Tabela 1– Valores de R_a obtidos a partir do padrão

Leituras	R_a (µm)
1	0,350
2	0,320
3	0,328
4	0,324
5	0,342
6	0,348
7	0,344
8	0,332
Média	0,336
Desvio padrão	0,011

8. Incerteza da calibração

A incerteza expandida (U) associada à calibração do rugosímetro é de 0,060 µm para k igual a 2,57 e 95,45 % de abrangência. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.

Data da Emissão: Uberlândia, (20) de (março) de (2012).

Rosenda Valdés Arencibia
Gerente Responsável

Marcus Aguiar Costa
Operador

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

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

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

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

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

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

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :

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

OBSERVAÇÕES :

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

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

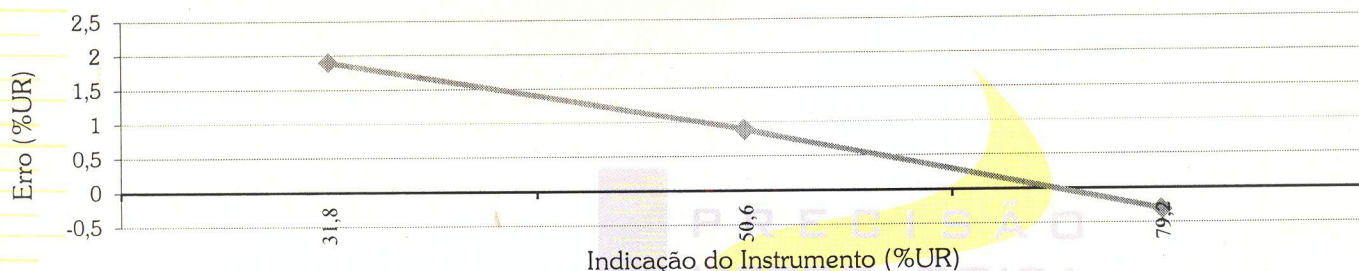
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

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

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

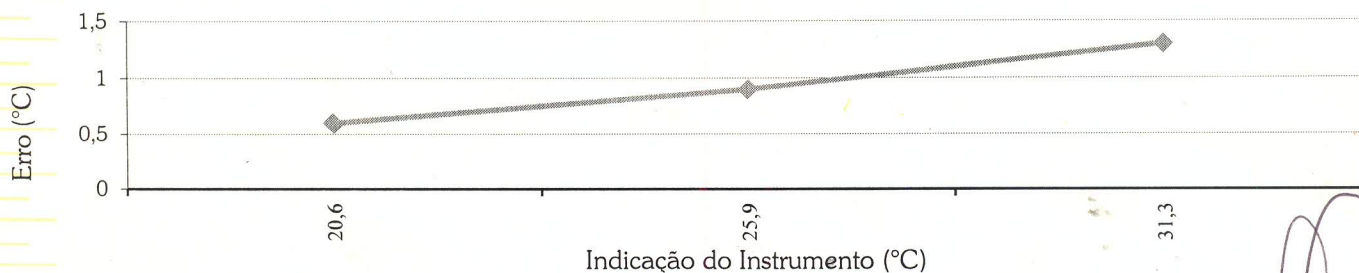
Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

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

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



~ Calibration Certificate ~

Per ISO 16063-21

Model Number: 352C33

Serial Number: 97521

Description: ICP® Accelerometer

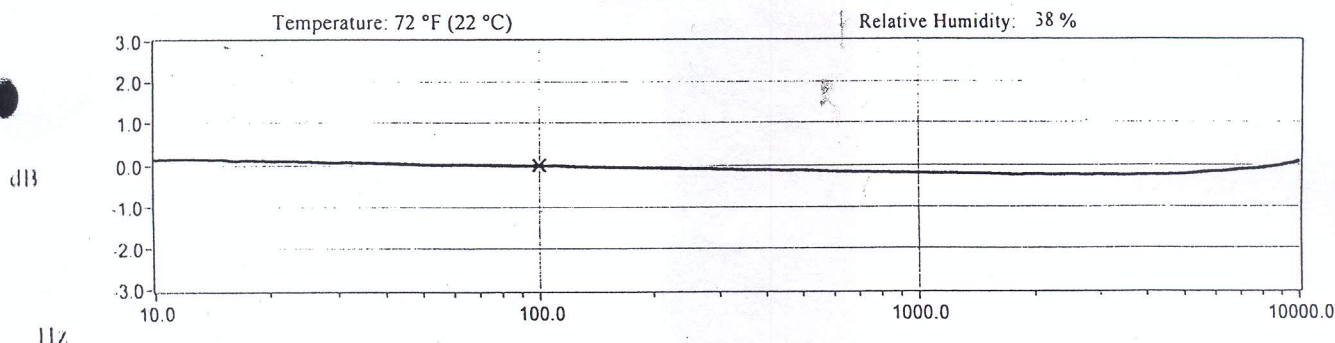
Method: Back-to-Back Comparison (AT401-3)

Manufacturer: PCB

Calibration Data

Sensitivity @ 100.0 Hz	99.9 mV/g	Output Bias	10.8 VDC
	(10.19 mV/m/s ²)	Transverse Sensitivity	2.1 %
Discharge Time Constant	1.4 seconds	Resonant Frequency	57.7 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10.0	1.6	300.0	-1.1	7000.0	-1.4
15.0	1.6	500.0	-1.4	10000.0	0.9
30.0	0.8	1000.0	-2.2		
50.0	0.2	3000.0	-2.7		
REF. FREQ.	0.0	5000.0	-2.6		

Mounting Surface: Stainless Steel w/Silicone Grease Coating Fastener: Stud Mount
Acceleration Level (rms): 10.0 g (98.1 m/s²)

Fixture Orientation: Vertical

*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.001 * (freq)^{1.5}
*The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/a

As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/274086 and PTB Traceable thru Project 1060.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCCL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Joseph Rogerson

Date: 09/17/08



Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043

Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839

TEL: 888-684-0013 FAX: 716-685-3886 www.pcb.com

cal2 - 3304525340 - 07