



**Marcelo Lima Alves**

**Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de  
Padrões de Massa Classe F2**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de  
Pós-graduação em Metrologia para a Qualidade  
Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. M.Sc. Gregório Salcedo Muñoz

Rio de Janeiro  
Outubro de 2002



Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marcelo Lima Alves**

Graduou-se em Engenharia Industrial Mecânica no CEFET-RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica em 1998. Completou o curso de Pós-graduação: Competência do Servidor Público. Participou de Congressos voltados a Qualidade Industrial – ENQUALAB e METROLOGIA 2000. Hoje, como funcionário concursado do INMETRO, se encontra na Diretoria de Metrologia Legal, mas especificamente na Divisão de Massas.

### Ficha Catalográfica

Alves , Marcelo Lima

Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de Padrões de Massa Classe F2/ Marcelo Lima Alves ;orientador :Prof. M.Sc. Gregório Salcedo Muñoz – Rio de Janeiro :PUC, Centro Técnico Científico da PUC, 2002

v.,130f.:il ;29,7cm

1.Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico da PUC.

Inclui referências bibliográficas

1. Metrologia 2. Confiabilidade 3. Rugosidade 4.Medição 5.Controle. I.Muñoz, Gregório Salcedo II. Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico da PUC. III.Título.



## Dedicatória

Obrigado meu Deus, por conseguir completar esse trabalho



## Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Gregório pelo estímulo e parceria para realização deste trabalho.

À Puc-Rio , pelos auxílios concedidos , sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

Ao INMETRO, na Diretoria de Metrologia Legal ,na pessoa do Diretor Roberto Luiz de Lima Guimarães, pelo fomento à pesquisa e à cultura metrológica, que muito engrandecem a diretoria.

À Divisão de Massas, na pessoa do chefe da divisão Dr. Mauro Fagundes pela atenção e auxílio em todas as etapas do trabalho.

A Diretoria de Metrologia Científica, especificamente ao LAMAS (Laboratório de Massas) e ao LAMIN (Laboratório de Mecânica)



Aos meus pais , pela educação, atenção e carinho em todas as horas.

A MITUTOYO Sul Americana pela possibilidade de fazer as medições dentro de seus laboratórios.

Aos meus colegas da Puc-Rio, em especial , à pessoa do meu colega e amigo Luiz Roberto pelo incentivo na busca de meus ideais.

A secretária do Mestrado , Eliane Albernaz, pelo seu auxílio em todos os momentos, onde sempre mostrou-se uma pessoa otimista, inteligente e bem humorada.

Aos professores que participaram da comissão examinadora.

Ao Prof. Mauricio Frota pelo apoio no decorrer do curso.

A todos os amigos e familiares que ,de uma forma ou de outra ,me estimularam a prosseguir trabalhando.

Ao SENAI-RJ pelo auxílio nas primeiras medições de rugosidade.



## Resumo

Alves, Marcelo Lima; Muñoz, Gregório Salcedo. **Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de Padrões de Massa Classe F2**. Rio de Janeiro, 2002.120p.Dissertação de Mestrado – Centro Técnico Científico , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação do efeito da medição da rugosidade sobre os valores de medição das massas de padrões de massa classe F2, em conformidade às exigências da Recomendação Internacional R 111 da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) e às normas ISO/97 ,referentes ao assunto.

O conceito de rugosidade e os parâmetros ( $R_a$  – roughness average e  $R_z$  – average of the roughness) foram adequadamente caracterizados no contexto da pesquisa desenvolvida. As medições de rugosidade foram realizadas em padrões de massa Classe F2 – 0,02 g, 0,05 g, 0,1g, 0,2 g, 0,5g, 1g, 2g, 5g, 10g, 20g, 50g, 100g, 200g e 500g, pôr meio de um rugosímetro tipo SJ 400.

Empregou-se método convencional com suspeita de retirar diminutas quantidades de matéria do objeto medido. Os padrões de massa Classe F2 - 0,05 g, 0,1g, 0,2 g, 0,5g, 1g, 2g e 5g utilizados foram calibrados antes e depois das medições , por apresentarem os menores erros máximos admissíveis.

A seguir, é mostrada a análise estatística dos dados experimentais na medição de rugosidade.

Finalmente, foi calculada a incerteza de medição dos resultados experimentais da coleção de padrão de massa Classe F2, bem como a conclusão sobre este trabalho experimental.

## Palavras-chave:

Metrologia; confiabilidade; rugosidade; medição; controle



## Abstract

Alves, Marcelo Lima; Muñoz, Gregório Salcedo (Advisor). **Effect of Roughness Measurement on the Mass of Class F2 Mass Standards.** Rio de Janeiro, 2002.120p.MSc. Dissertation – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work has as objective the evaluation of the effect of the roughness measurement on the mass measurement values of F2 class mass standards. The interest is analysing the conformity to the requirements of the International Recommendation R 111 of the International Organization of Legal Metrology (OIML) and to standards ISO/97, referring to the subject.

The roughness concept and the parameters, roughness average ( $R_a$ ), and average of the roughness ( $R_z$ ), were adequately characterized in the context of the developed research. The roughness measurements were carried out with the following F2 class mass standards: 0.02 g, 0.05 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.5 g, 1 g, 2 g, 5 g, 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 200 g and 500 g, with the aid of a profilometer SJ 400. The conventional method was used to remove small amounts of substance of the measured object. The used F2 class mass standards, 0.05 g, 0.1g, 0.2 g, 0.5 g, 1 g, 2 g and 5 g, were calibrated before and after the measurements, because they presented the smallest permitted maximum errors.

The statistical analysis related to the experiments is shown next.

Finally, the measurement uncertainty of the experimental results of the standard F2 mass collection was calculated and the conclusions of this study were presented.

## Keywords:

Metrology; confiability; roughness; measurement; control



## Sumário

1 . Introdução	20
1.1. A fundamentação	20
1.2. Motivação	22
1.3. Objetivo	22
2. Rugosidade Superficial	25
2.1.Histórico	25
2.2.Conceituação	29
2.2.1. Erros macrogeométricos	29
2.2.2. Erros microgeométricos	29
2.2.3. Rugosidade	30
2.2.4. Superfície geométrica	31
2.2.5. Superfície real	31
2.2.6. Superfície efetiva	32
2.2.7. Perfil geométrico	32
2.2.8. Perfil real	33
2.2.9. Perfil efetivo	33
2.2.10. Perfil de rugosidade	34
2.3.Definições	34
2.3.1. Rugosidade ou textura primária	34
2.3.2. Ondulação ou textura secundária	34
2.3.3. Orientação das irregularidades	35
2.3.4. Passo das irregularidades	35
2.4. Irregularidade da textura primária	35
2.4.1. Critérios para avaliar a rugosidade	36
2.5.Sistema de medição da rugosidade superficial	37



2.5.1. Sistema M	37
2.6. Parâmetros de rugosidade	38
2.6.1. Rugosidade média ( $R_a$ )	39
2.6.2. Rugosidade máxima ( $R_{\text{máx}}$ )	43
2.6.3. Rugosidade ( $R_z$ )	45
2.7. Representação da rugosidade	46
2.7.1. Identificação da superfície em desenhos técnicos	47
2.7.2. Indicações do estado de superfície no símbolo	49
2.7.3. Indicação nos desenhos	49
2.7.4. Direção das estrias	50
3. Padrões de massa	51
3.1. Aspectos gerais	51
3.1.1. As classes de exatidão da OIML	52
3.2. Unidades e valores nominais para as massas	53
3.2.1. Unidades	53
3.2.2. Valores nominais	54
3.3. Seqüência de padrões de massas	54
3.4. Requisitos Metrológicos	54
3.4.1. Erros máximos admissíveis nas verificações	54
3.4.2. Incerteza expandida	55
3.4.3. Massa convencional	55
3.5. Requisitos técnicos	55
3.6. Construção	57
3.7. Material	58
3.8. Condições da Superfície	58
3.9. Ajuste	59
3.10. Marcação	60



3.11. Apresentação	62
3.12. Controles metrológicos	62
3.13. Marcação de controle	64
4. Fundamentos da Metrologia	65
4.1. Introdução	65
4.2. Terminologia geral	66
4.2.1. Classe de exatidão	66
4.2.2. Balança	67
4.2.3. Calibração	67
4.2.4. Certificado de calibração	68
4.2.5. Padrão de verificação	68
4.2.6. Comparação	68
4.2.7. Massa convencional	68
4.2.8. Densidade de um corpo	69
4.2.9. Certificado de Conformidade	69
4.2.10. Modelo	69
4.2.11. Erro máximo permitido (emp)	70
4.2.12. Parâmetro de rugosidade ou parâmetro R ( $R_a$ ou $R_z$ )	70
4.2.13. Fator de escala	70
4.2.14. Peso de sensibilidade	70
4.2.15. Coleção de pesos	71
4.2.16. Ensaio	71
4.2.17. Peso de prova ( $m_t$ )	71
4.2.18. Verificação	71
4.2.19. Temperatura (t)	72
4.2.20. Peso	72
4.2.21. Peso de um corpo ( $F_g$ )	73
4.3. Terminologia para ensaios	73



4.3.1. Medição	73
4.3.2. Erros de Medição	73
4.3.3. Incerteza de Medição	73
4.3.4. Outros conceitos	74
4.4. Técnicas estatísticas aplicadas	77
4.4.1. Média Aritmética	77
4.4.2. Desvio padrão	78
4.4.3. Distribuição Normal de Probabilidade	78
4.4.4. Distribuição Retangular	79
4.4.5. Distribuição Triangular	80
4.4.6. Assimetria e Curtose	81
4.4.7. Critério de CHAUVENET	84
4.5. Terminologia específica aplicada	85
4.5.1. Avaliação “Tipo A” da Incerteza	85
4.5.2. Avaliação “Tipo B” da Incerteza	85
4.5.3. Incerteza Padrão-Combinada $u_c(y)$	86
4.5.4. A equação de WELCH SATTERWAITE	86
4.5.5. Fator de Abrangência (k) ou fator de Cobertura	87
4.5.6. Incerteza Expandida (U)	87
4.6. Apresentação dos resultados	87
4.6.1 Procedimento para determinação da incerteza de medição	88

5. Procedimento de Ensaio	89
5.1. Introdução	89
5.2. Avaliação Geral	90
5.2.1. Exemplar para comparação - Comparação visual	90
5.2.2. Procedimento com rugosímetro	91
5.3. Procedimentos de Ensaio	91



5.3.1. Inspeção visual (padrões de massa das classes E, F e M)	91
5.3.1.1. Para os padrões de massa novos	91
5.3.1.2. Para os padrões de massa usados	92
5.3.2. Exemplar para comparação da rugosidade	92
5.3.3. A medição de rugosidade usando instrumento	94
6. Resultados e Discussão	96
6.1. Resultados do ensaio de rugosidade	96
6.2. Análise estatística dos resultados	99
6.2.1. Análise para a normalidade dos valores	99
6.2.2. Critério de rejeição de um resultado (CHAUVENET)	103
6.2.2.1. Análise valores estatisticamente inconsistentes	104
6.3. Cálculo das incertezas	113
6.3.1. Cálculo da incerteza expandida	113
6.3.1.1. Est. da incerteza devido ao mensurando	113
6.3.1.2. Est. da incerteza devido ao padrão de rugosidade	114
6.3.1.3. Est. da incerteza devido à resolução do rugosímetro	114
6.3.1.4. Incerteza combinada (0,02g para o parâmetro Ra)	115
6.3.1.5. Cálculo da incerteza expandida $U_{(Ra)}$	115
6.4. Resultado final - massa (0,02g para o parâmetro Ra)	116
6.4. Resultados finais	126
7. Conclusões e Sugestões	128
7.1. Conclusão Final	128
7.2. Sugestões	129
8. Referências Bibliográficas	130



## Lista de Figuras

Figura 1 - Superfície Geométrica	31
Figura 2 - Superfície Real	31
Figura 3 - Superfície Efetiva	32
Figura 4 - Perfil Geométrica	32
Figura 5 – Perfil Real	33
Figura 6 – Perfil Efetivo	33
Figura 7 – Perfil de rugosidade	34
Figura 8 – Elementos que compõem a superfície	35
Figura 9 – Comprimento para avaliação da rugosidade	36
Figura 10 – Perfil de rugosidade e ondulação	37
Figura 11 – Cálculo do sistema M	38
Figura 12 – Medição Ra	39
Figura 13 – Medição R <sub>máx</sub>	44
Figura 14 – Medição Rz	45
Figura 15 – Indicação do estado de superfície	49
Figura 16 – Indicação de rugosidade	49
Figura 17 – Aspectos da curtose	82



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classe de rugosidade Ra	41
Tabela 2 – Comprimento da amostragem Ra (cut off)	42
Tabela 3 – Grupos de rugosidade	43
Tabela 4 – Formas de pesos de 1g ou menos	56
Tabela 5 – Valores máximos de rugosidade de superfície	59
Tabela 6 – Valores máximos aceitáveis nas marcações	60
Tabela 7 – Guia para determinação de ensaios	63
Tabela 8 - Rugosidade nas massas 0,02g , 0,05g e 0,1g	96
Tabela 9 - Rugosidade nas massas 0,2g , 0,5g e 1g	97
Tabela 10 - Rugosidade nas massas 2g , 5g e 10g	97
Tabela 11 - Rugosidade nas massas 20g , 50g e 100g	98
Tabela 12 - Rugosidade nas massas 200g , 500g	98
Tabela 13 – Análise da normalidade massas 0,02g , 0,05g e 0,1g	99
Tabela 14 - Análise da normalidade massas 0,2g , 0,5g e 1g	100
Tabela 15 - Análise da normalidade massas 2g , 5g e 10g	101
Tabela 16 - Análise da normalidade massas 20g , 50g e 100g	102
Tabela 17 - Análise da normalidade nas massas 200g e 500g	103
Tabela 18 - Critério de Chauvenet para massa 0,02g	104
Tabela 19 – Valores rechaçados 0,02g	104
Tabela 20 - Critério de Chauvenet para massa 0,05g	105
Tabela 21 - Valores rechaçados 0,05g	105
Tabela 22 - Critério de Chauvenet para massa 0,1g	106
Tabela 23 - Critério de Chauvenet para massa 0,2g	106
Tabela 24 - Critério de Chauvenet para massa 0,5g	107
Tabela 25 - Critério de Chauvenet para massa 1g	107
Tabela 26 - Critério de Chauvenet para massa 2g	108
Tabela 27 - Critério de Chauvenet para massa 5g	108



Tabela 28 - Valores rechaçados 5g	109
Tabela 29 - Critério de Chauvenet para massa 10g	109
Tabela 30 - Valores rechaçados 10g	110
Tabela 31 – Critério de Chauvenet para massa 20g	110
Tabela 32 - Critério de Chauvenet para massa 50g	111
Tabela 33 - Critério de Chauvenet para massa 100g	111
Tabela 34 - Critério de Chauvenet para massa 200g	112
Tabela 35 - Critério de Chauvenet para massa 500g	112
Tabela 36 - Incerteza de medição - Ra 0,02g	116
Tabela 37 - Incerteza de medição - Rz 0,02g	117
Tabela 38 - Incerteza de medição - Ra 0,05g	117
Tabela 39 - Incerteza de medição - Rz 0,05g	117
Tabela 40 - Incerteza de medição - Ra 0,1g	118
Tabela 41 - Incerteza de medição - Rz 0,1g	118
Tabela 42 - Incerteza de medição - Ra 0,2g	118
Tabela 43 - Incerteza de medição - Rz 0,2g	119
Tabela 44 - Incerteza de medição - Ra 0,5g	119
Tabela 45 - Incerteza de medição - Rz 0,5g	119
Tabela 46 - Incerteza de medição - Ra 1g	120
Tabela 47 - Incerteza de medição - Rz 1g	120
Tabela 48 - Incerteza de medição - Ra 2g	120
Tabela 49 - Incerteza de medição - Rz 2g	121
Tabela 50 - Incerteza de medição - Ra 5g	121
Tabela 51 - Incerteza de medição - Rz 5g	121
Tabela 52 - Incerteza de medição - Ra 10g	122
Tabela 53 - Incerteza de medição - Rz 10g	122
Tabela 54 - Incerteza de medição - Ra 20g	122
Tabela 55 - Incerteza de medição - Rz 20g	123
Tabela 56 - Incerteza de medição - Ra 50g	123
Tabela 57 - Incerteza de medição - Rz 50g	123



Tabela 58 - Incerteza de medição - Ra 100g	124
Tabela 59 - Incerteza de medição - Rz 100g	124
Tabela 60 - Incerteza de medição - Ra 200g	124
Tabela 61 - Incerteza de medição - Rz 200g	125
Tabela 62 - Incerteza de medição - Ra 500g	125
Tabela 63 - Incerteza de medição - Rz 500g	125
Tabela 64 - Resultados Finais:	126



## Lista de Quadros

Quadro 1 - Símbolos	47
Quadro 2 – Símbolos com Indicação da característica Ra	47
Quadro 3 – Símbolos de indicação complementares	48
Quadro 4 – Símbolos para indicações simplificadas	48
Quadro 5 – Símbolos para direção de estrias	50



## **Anexos**

Anexo I - Calibração e recalibração de padrões de massa

Anexo II - Tabela de erros máximos permitidos

Anexo III - Rugosímetro

Anexo IV - Microscópio

Anexo V - Coleção de padrões de massa

Anexo VI - Procedimento de medição