



Wellington Santos Barros

Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema de medição linear por interferometria laser.

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. Gregório Salcedo Muñoz

Rio de Janeiro
23 de setembro de 2002

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

Wellington Santos Barros

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Gama Filho em 1992. Trabalha no Laboratório de Metrologia Dimensional do Inmetro onde é Chefe Substituto do Laboratório e é responsável por calibrações e pesquisas na área de metrologia dimensional. É avaliador técnico e de sistema de laboratórios para credenciamento junto ao Inmetro, membro da Comissão Técnica de Dimensional da Divisão de Credenciamento de Laboratórios do Inmetro, membro do Comitê Setorial de Normalização do Mercosul e ABNT.

Ficha Catalográfica

Barros, Wellington Santos

Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema de medição linear por interferometria laser / Wellington Santos Barros; orientador: Gregório Salcedo Muñoz. – Rio de Janeiro: PUC, Centro Técnico Científico da PUC, 2002.

v.,120 f.: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico da PUC.

Inclui referências bibliográficas.

1. Metrologia dimensional. 2. Sistema laser de medição. 3. Laser interferométrico. I. Muñoz, Gregório Salcedo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico da PUC. III. Título.

Dedicatória

À minha esposa Vânia pela paciência e compreensão.

Aos meus filhos Lucas e Daniel pelo apoio.

Aos meus pais José e Porfíria pelo amor e educação recebida.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Grégório Salcedo Muñoz, um grande amigo, pelo apoio e pela paciência no desenvolvimento deste trabalho.

A Léa Contier de Freitas pelo precioso incentivo dado ao desenvolvimento da minha carreira.

Ao meu colega João Antônio Pires Alves, pelo apoio técnico nos pontos relevantes da dissertação, desempenhando com competência e dedicação um papel muito importante neste trabalho.

Ao colega José Carlos Valente de Oliveira, pela idealização da dissertação e pelo total apoio e compreensão.

Aos colegas do Laboratório, Luiz H. Brum, Marcos Motta, Paulo Câmara, André Luiz Moraes, pela dedicação, incentivo e apoio dado.

A Eliane Albernaz, secretária do ITUC, pela competência e dedicação em ajudar os alunos do curso.

Aos colegas do Inmetro, Luiz H. Paraguassú, Luiz C. Cabral, Jorge Cruz, Janice B. Fernandes, Marcelo S. Monteiro, José Renato R. Siqueira, Cláudio Roberto, Valter Aibe, Paulo G. Couto, Túlio P. Franklin, Valquimar e Írio, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Barros, Wellington Santos; Muñoz, Gregório Salcedo. Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema de medição linear por interferometria laser. Rio de Janeiro, 2002.120 p. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem por objetivo implantar um método para calibração de sistema de medição linear por interferometria laser por meio de comparação a um outro sistema laser de referência. O referido método é considerado mais simples que a calibração por componentes realizada atualmente e, conforme demonstrado no trabalho, apresenta confiabilidade metrológica que atende a exatidão necessária para as aplicações dos lasers em metrologia dimensional, vindo suprir uma necessidade metrológica dos laboratórios credenciados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) e do parque industrial brasileiro, usuários destes sistemas de medição. A implantação do sistema para calibração de lasers de medição foi baseada em normas internacionais de calibração e de cálculo da incerteza de medição e utilizou um sistema laser de referência calibrado no Inmetro, com rastreabilidade a padrões nacionais, com as menores incertezas possíveis. O método de medição implantado realiza a calibração de um sistema laser por comparação a outro utilizando medições feitas a partir do deslocamento da mesa onde é apoiado o prisma óptico. O que é de fato analisado é a diferença das medições dos dois sistemas laser para um mesmo deslocamento. Foram registradas as diferenças das indicações de 200 mm em 200 mm de deslocamento, em um total de 2000 mm, que variaram de 0,027 μm a 0,690 μm . Foram realizadas três medições para cada deslocamento e quatro repetições completas do procedimento em dias diferentes, com variação do desvio padrão de 0,009 μm a 0,098 μm e incertezas expandidas que variaram de 0,109 μm a 0,306 μm . São apresentadas a metodologia de calibração, cálculos das correções, fontes de erros e cálculos da incerteza de medição para a comparação de sistemas lasers de medição linear.

Palavras-chave:

Metrologia dimensional, sistema laser de medição, laser interferométrico

Abstract

The present work aims at the implementation of a calibration method for interferometric linear laser measurement systems by comparison to another reference system. The proposed method is considered simpler than the calibration by components that is carried out today at Inmetro (National Institute of Metrology, Standardization and Industrial Quality) and, as demonstrated along this work, presents the metrological reliability and accuracy necessary for several applications of lasers in dimensional metrology. This approach will supply the metrological needs of several laboratories accredited by Inmetro and of the Brazilian industry in general, users of such measurement systems, regarding cost and time of calibration. The method implemented was based on international technical standards related to calibration and uncertainty calculation and used a reference system calibrated at Inmetro, with traceability to national standards, with the lowest uncertainties that could be achieved. The said method performs the calibration of a laser system by comparison to another through measurements of the displacement of the table where the optical prism rests. What is indeed analyzed is the difference of the measurements obtained by the two laser systems for the same table displacement. The differences were recorded for each displacement of 200 mm, in a total of 2,000 mm, their variation being from 0.027 μm to 0.690 μm . The whole procedure was repeated four times, in different days, with three measurements for each displacement. Their standard deviation varied from 0.009 μm to 0.098 μm while their expanded uncertainties varied from 0.109 μm to 0.306 μm depending on the value of the displacement. The calibration methodology, correction calculation, errors sources and measurement uncertainty calculations for the linear measurement laser systems comparison are presented in this dissertation.

Keywords:

Dimensional metrology; laser system; laser interferometric

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Objetivo e Motivação.....	15
1.2. Organização da Dissertação.....	20
2. Sistema Laser de Medição	22
2.1. Definições e Breve Histórico.....	22
2.2. Princípios da Física do Laser.....	23
2.3. Componentes do Sistema de Geração do Laser.....	24
2.4. Classificação dos Laseres.....	26
2.5. Interferômetro de Michelson.....	29
2.6. Princípio de Funcionamento do Laser para Medição Linear.....	31
2.7. Aplicação do Laser Específica em Metrologia Dimensional.....	33
2.7.1. Calibração de Máquina-Ferramenta.....	33
2.7.2. Calibração de Máquina de Medição.....	36
2.7.3. Acoplamento a Dispositivos de Medição Linear.....	38
3. Sistema de Referência para Calibração do Sistema Laser	40
3.1. Considerações Gerais.....	40
3.2. Tipos de Arranjos de Medição.....	41
3.2.1 Deslocamento dos Feixes dos Laseres em Sentidos Opostos.....	41
3.2.2. Deslocamento dos Feixes dos Laseres no Mesmo Sentido.....	43
3.2.3 Simétrico com Prisma Triplo Especial.....	44
3.2.4 Critério para Escolha do Arranjo de Medição.....	47
3.3. Descrição do Processo de Calibração.....	48
3.3.1. Condições Ambientais da Calibração.....	50
3.3.2. Posição dos Sensores Ambientais e do Material.....	51
3.3.3. Equipamento e Acessórios Utilizados.....	51
3.3.4. Montagem do Sistema de Medição.....	53
3.3.5. Alinhamento dos Sistemas Laseres.....	54
3.4. Observações sobre o Procedimento Experimental.....	57
4. Fontes de Erros na Medição com Sistemas Laser	58
4.1. Efeitos da Condição Ambiental e da Temperatura do Objeto.....	58
4.1.1 Compensação do Índice de Refração.....	58

4.1.2. Compensação da Temperatura do Objeto	61
4.2. Erro devido ao Comprimento “Morto”	63
4.2.1. Erro de Comprimento “morto” devido ao comprimento de onda.....	64
4.2.2. Erro de Comprimento “morto” devido à dilatação térmica	65
4.3. Instabilidade devido a Turbulência do Ar.....	66
4.4. Erro devido ao Alinhamento “Erro Co-seno”	67
5. Avaliação dos Resultados e das Incertezas de Medição	71
5.1. Resultados	71
5.2. Estatística Aplicada aos dados de medição	72
5.2.1. Teste da diferença entre variâncias	72
5.2.2. Teste da diferença entre duas médias	74
5.3. Incerteza de Medição	75
5.3.1. Etapas para o Cálculo da Incerteza de Medição	75
5.3.2. Modelo Matemático da Medição.....	76
5.3.3. Incerteza Padrão do Tipo A (Repetitividade).....	78
5.3.4. Incerteza Padrão do Tipo B.....	79
5.3.5. Coeficiente de Sensibilidade c_i	84
5.3.6. Contribuição para a Incerteza Padrão	86
5.3.7. Incerteza Padrão Combinada $u_c(y)$	86
5.3.8. Incerteza Expandida U	86
6. Conclusões e Recomendações.....	89
 Referências Bibliográficas	 92
 7. Apêndices	 95
Apêndice 1 – Erros Máximos Admissíveis Posicionamento	96
Apêndice 2 – Padrões de referência	97
Apêndice 3 – Radiações Recomendadas de Laseres Estabilizados.....	100
Apêndice 4 – Revisão da Equação de Edlén Realizada por Bönsch	104
Apêndice 5 – Tendência das Séries de Medição	105
Apêndice 6 – Análise Estatística	109
Apêndice 7 – Comparação dos erros dos sensores do Sistema-objeto .	114
Apêndice 8 – Planilhas de Incerteza de Medição.....	117

Lista de figuras

Figura 1.1 – Rastreabilidade atual para sistemas laseres	17
Figura 1.2 – Rastreabilidade proposta para sistemas laseres.....	18
Figura 2.1 – Primeiro laser a gás (He e Ne)	22
Figura 2.2 – Esquema de um laser com meio ativo sólido	26
Figura 2.3 – Esquema de um laser com meio ativo gasoso.....	27
Figura 2.4 – Esquema de um laser com meio semiconductor	28
Figura 2.5 – Interferômetro de Michelson.....	29
Figura 2.6 – Partes de um sistema laser de medição	31
Figura 2.7 – Princípio de funcionamento do divisor de feixe do laser	32
Figura 2.8 – Seis graus de liberdade do movimento uma máquina.....	35
Figura 2.9 – Medição de posicionamento em X de um torno mecânico ...	36
Figura 2.10 – Medição de retitude em X de uma MMC	37
Figura 2.11 – Medição de bloco-padrão por comparação	38
Figura 3.1 – Vista superior do arranjo de acordo com.....	42
Figura 3.2 – Representação do erro abbe.....	42
Figura 3.3 - Arranjo medição de acordo com [15]	44
Figura 3.4 – Arranjo simétrico de acordo com [15] vista superior	45
Figura 3.5 – Arranjo simétrico de acordo com [15] vista lateral.....	45
Figura 3.6 – Arranjo simétrico de acordo com [15]	46
Figura 3.7 – Vista de frontal do prisma triplo de medição especial	46
Figura 3.8 – Caminho geométrico percorrido pelos feixes dos laseres	49
Figura 3.9 – Sistema de medição vista 1	52
Figura 3.10 – Sistema de medição vista 2	53
Figura 3.11 – Montagem para auxiliar o alinhamento do sistema-objeto	56
Figura 4.1 – Exemplo do comprimento “morto”	63
Figura 4.2 – Erro co-seno com espelho plano.....	67
Figura 4.3 – Erro co-seno com prisma de medição.....	67
Figura 4.4 – Distância S entre os feixes de referência e de medição.....	69
Figura 4.5 – Efeito ótico do desalinhamento do feixe do laser	70
Figura 5.1 – Gráfico do Desvio Padrão Combinado	87
Figura.5.2 – Gráfico das Incerteza de MediçãoxComprimento.....	88

Figura 6.1 – Banho termostático especial	90
Figura A.5.1 – Gráfico da tendência da Medição 1	105
Figura A.5.2 – Gráfico da tendência da Medição 2	106
Figura A.5.3 – Gráfico da tendência da Medição 3	107
Figura A.5.4 – Gráfico da tendência da Medição 4	108
Figura A.7.1 – Gráfico dos erros do sensor de temperatura do material	114
Figura A.7.2 – Gráfico dos erros do sensor de temperatura do ar	115
Figura A.7.3 – Gráfico dos erros do sensor de umidade	115

Lista de tabelas

Tabela 1 – Critérios para escolha do arranjo de medição	48
Tabela 2 – Erro co-seno x ângulo de inclinação do alinhamento	69
Tabela 3 – Incertezas padrão associadas aos padrões de referência	80
Tabela A.1.1 – Erros Máximos Admissíveis de Posicionamento para Máquinas-Ferramenta	96
Tabela A.2.1 – Resultados do Higrômetro e a Incerteza em %.....	97
Tabela A.2.2 – Resultados do Termômetro 1 e a incerteza em °C	97
Tabela A.2.3 – Resultados do Termômetro 2 e a incerteza em °C	98
Tabela A.2.4 – Resultados do Barômetro e a incerteza em mmHg.....	98
Tabela A.3.1 – Tipos de Laseres Estabilizados.....	100
Tabela A.5.1 – Registro da Medição 1	105
Tabela A.5.2 – Registro da Medição 2	106
Tabela A.5.3 – Registro da Medição 3	107
Tabela A.5.4 – Registro da Medição 4	108
Tabela A.6.1 – Registro da Medição 1	109
Tabela A.6.2 – Comparação das Variâncias 1 e 2	109
Tabela A.6.3 – Comparação das Variâncias 1, 2 e 3	109
Tabela A.6.4 – Comparação das Variâncias 1,2,3 e 4	110
Tabela A.6.5 – Comparação das médias 1 e 2	111
Tabela A.6.6 – Comparação das médias 1 e 3	111
Tabela A.6.7 – Comparação das médias 1 e 4	112
Tabela A.6.8 – Comparação das médias 2 e 3	112
Tabela A.6.9 – Comparação das médias 2 e 4	112
Tabela A.6.10 – Comparação das médias 3 e 4	113
Tabela A.8.1 – Planilha de Incerteza para 200 mm.....	117
Tabela A.8.2 – Planilha de Incerteza para 2000 mm.....	119

Lista de símbolos e nomenclaturas

Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;
NIST	National Institute of Standards and Technology;
PTB	Physikalisch Technisch Bundesanstalt;
Lamin	Laboratório de Metrologia Dimensional;
RBC	Rede Brasileira de Laboratórios de Calibração;
ITS-90	Escala Internacional de Temperatura de 1990;
λ_{vac}	comprimento de onda da luz no vácuo
λ_{ar}	comprimento de onda da luz no ar
p	pressão atmosférica;
f	umidade relativa;
T	temperatura ambiente;
α	coeficiente de dilatação térmica
ϖ_c	erro de comprimento “morto” devido ao comprimento de onda;
ϖ_o	erro de comprimento “morto” devido à dilatação térmica do objeto a calibrar;
θ	ângulo de inclinação do alinhamento
ξ	erro co-seno
S	distância entre os feixes de referência e de medição no alvo do cabeçote
L_0	indicação do comprimento no laser de referência nas condições ambientais padronizadas;
η_0	índice de refração do ar nas condições ambientais padronizadas;
η	índice de refração do ar nas condições ambientais de medição;
$L_{R,\eta}$	comprimento medido pelo laser de referência, corrigido para as condições ambientais de medição;
L_R	comprimento do padrão a calibrar, medido pelo laser de referência, corrigido para a temperatura de 20 °C;
ε	erro de indicação do sistema-objeto;

L_x	indicação no laser em calibração do comprimento do padrão a calibrar corrigido para temperatura de 20 °C;
Δ_{E_1}	erro devido ao alinhamento do sistema-objeto;
Δ_{E_2}	erro devido ao alinhamento do sistema-referência;
e_{R_1}	erro de resolução do sistema-objeto;
e_{R_2}	erro de resolução do sistema-referência;
e_{f_1}	erro de instabilidade do sistema-objeto;
e_{f_2}	erro de instabilidade do sistema-referência;
$\Delta\varpi_o$	erro devido à diferença dos comprimentos “mortos” dos lasers;
c_i	coeficiente de sensibilidade;
U	incerteza expandida;
$u_i(y)$	contribuição à incerteza padrão;
$u_c(y)$	incerteza padrão combinada;
k	fator de abrangência.