



Rodrigo Cruz Alves Roçadas

**Desenvolvimento e Implementação de
Processos de Calibração no Domínio das
Medições Angulares**

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss
Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL
Coorientadora: Dr.^a Maria Fernanda Leitão da Silva Saraiva,
Instituto Português da Qualidade

Presidente: Professor Doutor António Manuel Flores Romão de Azevedo
Gonçalves Coelho.

Arguente: Professora Doutora Maria da Glória Pereira Antunes.

Vogal: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas,
Dr.^a Maria Fernanda Leitão da Silva Saraiva.



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013

Desenvolvimento e Implementação de Processos de Calibração no Domínio das Medições
Angulares

Copyright, 2013, Rodrigo Cruz Alves Roçadas, FCT/UNL, IPQ e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

É quase impossível citar todas as pessoas que foram importantes no decorrer deste trabalho e do meu percurso académico, seja pelo apoio direto ou pelo apoio moral

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais e meu irmão, Margarida, Rogério e Bruno por todo o apoio, motivação, paciência e esforços económicos que tiveram comigo nesta etapa da vida. Agradeço especialmente por terem sempre confiado em mim.

À coorientadora, Doutora Fernanda Saraiva, responsável do Laboratório de Comprimento do Instituto Português da Qualidade, agradeço a confiança depositada em mim, a orientação, as sugestões, revisões do texto, disponibilidade, compreensão, conhecimentos de vida e o apoio que foram imprescindíveis à realização desta dissertação. Gostaria ainda de agradecer a oportunidade de realização do estágio no Instituto Português da Qualidade, bem como a disponibilização de um computador que me permitiu escrever a dissertação.

Agradeço à Professora Doutora Helena Navas, do DEMI, pela orientação, disponibilidade e conselho na escrita da dissertação.

O meu agradecimento também à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os professores que tive no decorrer do curso pela contribuição que tiveram na minha formação académica.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo deste percurso no IPQ e na faculdade, um especial agradecimento ao André Bandeira, David Nunes e ao Jorge Martins pela amizade demonstrada.

Aos meus restantes colegas do curso e amigos de longa data, Júlia Pereira, Hugo Guimarães, Sílvia Lourenço, Sílvia Felício, entre outros, um muito obrigado.

Por fim, mas não por último, um especial agradecimento à família Bandeira e família Martins por todo o carinho e amor dedicado à minha pessoa

Muito Obrigado

Resumo

O trabalho desenvolvido no decurso da elaboração da dissertação aqui apresentada decorreu no Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade no âmbito de estágio.

Partindo das informações recolhidas e documentação de suporte da atividade metrológica foram desenvolvidos neste projeto várias ações que visaram o melhoramento e alargamento dos serviços metrológicos prestados.

Foram propostos melhoramentos nos procedimentos de calibração implementados e foi elaborado um novo procedimento para a calibração de sutas, tendo sido estudado o método a aplicar bem como o balanço de incerteza respetivo.

A análise dos resultados de medição obtidos no estudo do comportamento do autocolimador foi uma das atividades mais relevantes deste trabalho, pois incluiu a definição do conjunto de condições de reprodutibilidade (diferentes operadores, diferentes sistemas de medição, montagens e número de medições repetidas) a definir de modo a obter-se a melhor reprodutibilidade de medições (fidelidade ou precisão de medição).

O laboratório pode agora analisar o comportamento do autocolimador variando a distância do comprimento percorrido pelo feixe do autocolimador e a abertura do feixe, pois conseguiu-se definir o método de medição que conduz à minimização da reprodutibilidade de medições.

A tarefa proposta e concretizada nesta dissertação, para a criação de um novo serviço de calibração, deu resposta a atividades de inovação e desenvolvimento.

Com os trabalhos realizados o laboratório de comprimento adquiriu valências para o fornecimento de uma nova calibração, a calibração de níveis eletrónicos, bem como o conjunto de ações a implementar no sentido de reduzir o balanço de incertezas na calibração deste equipamento do domínio metrológico de ângulo.

Palavras-chave

Ângulo Plano, Radiano, Calibração, Medição, Incerteza, Meterologia.

Abstract

The work developed during the elaboration of the thesis presented here took place in the Metrology Department of the Portuguese Institute of Quality within stage.

Starting from the information collected and supporting documentation of metrological activity were developed in this project several actions aimed at the improvement and enlargement of the metrological services provided.

Has been proposed improvements in implemented calibration procedures and was developed a new procedure for bevel calibrating, and studied the method to be applied as well as the balance of the respective uncertainty.

The analysis of the measurement results obtained in the study of the behavior of the autocollimator was one of the most relevant of this work, as she included the definition of the set of reproducibility conditions (different operators, different measurement systems, assemblies, and number of repeated measurements) define so as to obtain the best measurement reproducibility (accuracy or measurement accuracy).

The laboratory may now analyze the behavior of the autocollimator varying the distance traveled by the beam length, and beam width autocollimator therefore able to define the measurement method leads to minimization of the measurement reproducibility.

The task proposed and implemented in this thesis, for creating a new calibration service, responded to innovation activities and development.

With the work undertaken the laboratory acquired valences for the supply of a new calibration, the calibration of electronic levels, as well as the set of actions to be implemented to reduce the balance of uncertainties in the calibration of this equipment metrological field angle.

Key-Words

Plane Angle, Radian, Calibration, Measuring, Uncertainty, Meterology.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos da Dissertação.....	2
1.2	Estrutura da Dissertação.....	3
2	Enquadramento	5
2.1	Metrologia.....	5
2.2	Instituto Português da Qualidade.....	6
2.3	Departamento de Metrologia.....	8
2.4	Laboratório de Comprimento.....	8
2.5	Sistema Internacional de Unidades.....	9
2.5.1	Radiano.....	10
3	Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição.....	13
3.1	Incerteza de Medição.....	13
3.2	Avaliação da Incerteza de Medição das Grandezas de Entrada.....	14
3.2.1	Avaliação de Tipo A.....	15
3.2.2	Avaliação de Tipo B.....	15
3.2.2.1	Distribuição Normal.....	16
3.2.2.2	Distribuição Retangular.....	16
3.2.2.3	Distribuição Triangular.....	17
3.2.3	Incerteza-Padrão da Mensuranda.....	17
3.2.4	Incerteza de Medição Expandida.....	18
3.2.5	Resultado da Incerteza de Medição.....	19
4	Calibrações de Instrumentos de Medição de Ângulo.....	21
4.1	Padrão de Medição.....	22
4.1.1	Padrão de Medição de Referência.....	22
4.1.1.1	Autocolimador.....	22
4.1.1.2	Sistema Interferométrico Laser <i>HP</i>	23
4.1.1.3	Blocos Padrão Angulares.....	24
4.1.2	Padrão de Medição de Trabalho.....	24
4.1.2.1	Mesa Rotativa Tekniker.....	24
4.1.2.2	Polígono.....	25
4.2	Acessórios Complementares.....	26
4.2.1	Mesa Niveladora.....	26

4.2.2	“AC-Finder Prism”	26
4.2.3	Base de Fixação	27
4.2.4	Elevadores e Plataformas com Ajuste Micrométrico	27
4.2.5	Plano Ótico	28
4.2.6	Nível de Bolha	28
4.2.7	Mesa Indexada	29
4.2.8	Sistema de Aquisição de Temperaturas	29
4.3	Processos de Calibração	30
4.3.1	Calibração de Mesas Indexadas/Rotativas e Polígonos Padrão	30
4.3.1.1	Verificações Iniciais	31
4.3.1.2	Medidas de Segurança a Respeitar	31
4.3.1.3	Descrição do Equipamento a Utilizar	31
4.3.1.3.1	Colocação da Mesa Rotativa Tekniker em Funcionamento	31
4.3.1.3.2	Medição com o Autocolimador, ELCOMAT HR	32
4.3.1.4	Modo Operatório	33
4.3.1.5	Minimizar o Erro Piramidal	34
4.3.1.6	Procedimento Experimental	34
4.3.1.7	CrITÉrios de Aceitação do Valor de Medição	36
4.3.1.8	Avaliação da Incerteza de Medição da Mesa Indexada/Rotativa e Polígonos	37
4.3.2	Calibração de Blocos Angulares Usando a Mesa Rotativa	40
4.3.2.1	Verificações Iniciais	40
4.3.2.2	Medidas de Segurança a Respeitar	40
4.3.2.3	Descrição dos Equipamentos a Utilizar	40
4.3.2.4	Modo Operatório	41
4.3.2.5	Minimização do Erro Piramidal	42
4.3.2.6	Procedimento Experimental	43
4.3.2.7	CrITÉrios de Aceitação do Valor Medido	44
4.3.2.8	Avaliação da Incerteza de Medição de Calibração de Blocos Angulares	44
4.3.3	Calibração de Óticas Angulares	48
4.3.3.1	Verificações Iniciais	48
4.3.3.2	Medidas de Segurança a Respeitar	48
4.3.3.3	Descrição dos Equipamentos a Utilizar	48
4.3.3.4	Modo Operatório	49
4.3.3.5	Procedimento Experimental	50

4.3.3.6	Critérios de Aceitação	51
4.3.3.7	Determinação de E.....	51
4.3.3.8	Avaliação da Incerteza de Medição	52
4.3.4	Processo a Implementar: Calibração de Sutas	55
4.3.4.1	Verificações Iniciais	55
4.3.4.2	Medidas de Segurança a Respeitar	55
4.3.4.3	Modo Operatório	56
4.3.4.4	Procedimento Experimental.....	57
4.3.4.5	Critérios de Aceitação do Valor de Medição.....	61
4.3.4.6	Avaliação da Incerteza de Medição	61
5	Calibração de Autocolimadores	63
5.1	Método de Medição e Procedimento Experimental.....	63
5.2	Valores Obtidos.....	65
5.3	Critérios de Aceitação dos Valores Medidos.....	70
5.4	Balanço de Incerteza.....	71
5.5	Resultado de Medição (Análise dos Valores Obtidos)	73
6	Projeto de Calibração de Níveis Eletrônicos	75
6.1	Estudo do Equipamento a Ser Calibrado.....	75
6.1.1	Sistemas de Medição de Inclinação.....	75
6.1.1.1	Níveis de Bolha	76
6.1.1.2	Níveis Eletrônicos.....	78
6.2	Planeamento Inicial do Projeto	78
6.3	Solução para o Projeto	79
6.3.1	Montagem.....	79
6.3.1.1	Montagem com o Autocolimador.....	79
6.3.1.2	Montagem com o Sistema de Interferómetro Laser.....	80
6.3.1.3	Montagem com Autocolimador e Sistema de Interferómetro Laser.....	81
6.3.2	Modo Operatório	82
6.3.3	Execução da Calibração.....	83
6.3.4	Dados a Registrar e Avaliação.....	83
6.3.5	Balanço de Incertezas com o Padrão de Referência Autocolimador	84
6.3.6	Balanço de Incertezas cm o Padrão de Referência Interferómetro Laser <i>HP</i>	87
7	Estudo de Mesas Niveladoras.....	91
7.1	Soluções do Fabricante Newport.....	91

7.2	Soluções do Fabricante Aerotech	92
7.3	Seleção da Mesa Niveladora.....	93
8	Conclusões.....	95
8.1	Análise de Resultados.....	95
8.2	Sugestão para Trabalhos Futuros.....	96
	Bibliografia	97
	Bibliografia Consultada.....	99
	Anexos	101
	Anexo A: Certificado de Calibração de Mesas Indexadas/Rotativa	103
	Anexo B: Certificado de Calibração de um Polígono	105
	Anexo C1: Valores da Medição de um Bloco Angular	107
	Anexo C2: Certificado de Calibração de Blocos Angulares	111
	Anexo D: Certificado de Calibração de Óticas Angulares	113
	Anexo E1: Procedimento de Calibração de Sutas	115
	Anexo E2: Certificado de Calibração de Sutas	121
	Anexo F1: Valores Obtidos na Medição nº3 na Calibração de Autocolimadores	123
	Anexo F2: Certificado de Calibração de Autocolimadores.....	131

Índice Figuras

Figura 2.1 - Áreas da Metrologia.....	5
Figura 2.2 - Foto do Laboratório de Medições Angulares (L2).....	9
Figura 2.3 - Radiano Unidade da Grandeza Derivada Ângulo Plano.....	10
Figura 3.1 - Distribuição Normal [8].....	16
Figura 3.2 - Distribuição Retangular.....	17
Figura 3.3 - Distribuição Triangular.....	17
Figura 4.1 - Suta com Sistema de Leitura Analógica.....	21
Figura 4.2 - Autocolimador ELCOMAT HR da Möeller-Wedel.....	22
Figura 4.3 - Princípio de Medição de um Autocolimador.....	23
Figura 4.4 - Sistema Interferométrico Laser HP Composto pela Unidade Laser (1), Interferómetro Angular (a) e Refletor Angular (b).....	23
Figura 4.5 - Exemplo de Blocos Padrão Angulares.....	24
Figura 4.6 - Mesa Rotativa Tekniker.....	25
Figura 4.7 - Polígono Padrão Angular de 9 Faces.....	25
Figura 4.8 - Mesa Niveladora Newport.....	26
Figura 4.9 - "AC-Finder Prism".....	26
Figura 4.10 - Base de Fixação.....	27
Figura 4.11 - Haste com Plataforma de Altura Ajustável Newport (a) e Elevador Vertical Newport, Modelo 271 (b).....	27
Figura 4.12 - Plano Ótico.....	28
Figura 4.13 - Nível de Bolha com Resolução Horizontal e Vertical de Respetivamente 0,05 mm/m e 0,4 mm/m.....	28
Figura 4.14 - Mesa Indexada.....	29
Figura 4.15 - Sistema de Aquisição de Temperaturas Opus 10 da Lufft.....	29
Figura 4.16 - Esquema da Utilização do "AC-Finder Prism".....	32
Figura 4.17 - Esquema para a Calibração de Mesas Rotativas e Indexadas.....	33
Figura 4.18 - Esquema de Montagem para a Calibração de Blocos Padrão Angulares.....	41
Figura 4.19 - Esquema para Identificação das Faces de Medição do Bloco Angular.....	42
Figura 4.20 - Exemplo de Posicionamento Bloco Angular e da Mesa Rotativa.....	44
Figura 4.21 - Esquema do Refletor Angular e Mensuranda em Avaliação.....	48
Figura 4.22 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração das Óticas Angulares dos Sistemas Interferométricos.....	49
Figura 4.23 - Alinhamento das Faces do Interferómetro Angular e Refletor Angular.....	50

Figura 4.24 - Janela do Programa: Mesa indexada.vi	51
Figura 4.25 - Esquema da Suta	55
Figura 4.26 - 1º Quadrante.....	57
Figura 4.27 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45º para o 1º Quadrante da Suta .	57
Figura 4.28 - 2º Quadrante.....	58
Figura 4.29 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45º para o 2º Quadrante da Suta .	58
Figura 4.30 - 3º Quadrante.....	59
Figura 4.31 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45º para o 3º Quadrante da Suta .	59
Figura 4.32 - 4º Quadrante.....	60
Figura 4.33 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45º para o 4º Quadrante da Suta .	60
Figura 5.1 - Esquema para a Calibração de Autocolimadores	64
Figura 5.2 - Erro de Medição em X da Medição nº1 com Posição Inicial de Referência igual a 0º	66
Figura 5.3 - Variação em Y da Medição nº1 com Posição Inicial de Referência igual a 0º.....	66
Figura 5.4 - Erro de Medição em X da Medição nº2 com Posição Inicial de Referência igual a 0º	67
Figura 5.5 - Variação em Y da Medição nº2 com Posição Inicial de Referência igual a 0º.....	67
Figura 5.6 - Erro de Medição em X da Medição nº3 com Posição Inicial de Referência igual a 0º	67
Figura 5.7 - Variação em Y da Medição nº3 com Posição Inicial de Referência igual a 0º.....	67
Figura 5.8 - Erro de Medição em X da Medição nº4 com Posição Inicial de Referência igual a 0º	68
Figura 5.9 - Variação em Y da Medição nº4 com Posição Inicial de Referência igual a 0º.....	68
Figura 5.10 - Erro de Medição em X da Medição nº5 com Posição Inicial de Referência igual a 0º	68
Figura 5.11 - Variação em Y da Medição nº5 com Posição Inicial de Referência igual a 0º.....	68
Figura 5.12 - Erro de Medição em X da Medição nº6 com Posição Inicial de Referência igual a 45º	69
Figura 5.13 - Variação em Y da Medição nº6 com Posição Inicial de Referência igual a 45º	69
Figura 5.14 - Erro de Medição em X da Medição nº7 com Posição Inicial de Referência igual a 90º	69
Figura 5.15 - Variação em Y da Medição nº7 com Posição Inicial de Referência igual a 90º	69
Figura 5.16 - Erro de Medição em X da Medição nº8 com Posição Inicial de Referência igual a 90º	70
Figura 5.17 - Variação em Y da Medição nº8 com Posição Inicial de Referência igual a 90º	70
Figura 6.1 - Inclinação Absoluta (1) e Inclinação Relativa (2)	76
Figura 6.2 - Nível de Bolha com Resolução Horizontal de 0,05 mm/m.....	76
Figura 6.3 - Frasco com Marcação do Tipo A (1), Tipo B (2) ou Tipo C (3)	77
Figura 6.4 - Triângulo Retangular	77

Figura 6.5 - Equipamento Constituído por um Nível com Display Eletrônico e Duas Cápsulas com Líquido Preenchido Parcialmente com Ar.....	78
Figura 6.6 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrônicos e Equipamentos Disponíveis	78
Figura 6.7 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrônicos Usando Apenas o Autocolimador ELCOMAT HR como Padrão de Referência.....	79
Figura 6.8 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrônicos Usando Apenas o Sistema de Interferómetro Laser como Padrão de Referência	80
Figura 6.9 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrônicos Usando dois Sistemas de Referência, Autocolimador e Sistema de Interferómetro Laser.....	81
Figura 6.10 - Configuração da Posição do Nível a Calibrar (1), do Refletor Angular (2) e do Espelho Refletor (4) sobre a Base Acoplada à Mesa Niveladora (9)	82
Figura 6.11 - Orientação das Faces do Refletor Angular e do Interferómetro Angular.....	82
Figura 7.1 - Mesa Niveladora – TGN80.....	91
Figura 7.2 - Mesa Niveladora - ATT185-5.....	92

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Múltiplos e Submúltiplos não Decimais da Grandeza Ângulo Plano [5]	10
Tabela 3.1 - Fatores de Expansão k para Diferentes Números de Graus de Liberdade Efetivos v_{ef}	19
Tabela 4.1 - Especificações Técnicas da Mesa Niveladora Modelo M-PO46BD-75 [14].....	26
Tabela 4.2 - Matriz Procedimento na Calibração de Mesas Rotativas e Indexadas	35
Tabela 4.3 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza da Calibração de Mesas Indexadas/Rotativas e Polígonos	39
Tabela 4.4 - Componentes do Balanço de Incerteza da Calibração dos Blocos Padrão Angulares	47
Tabela 4.5 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Óticas Angulares.....	54
Tabela 4.6 - Valor Nominal α	56
Tabela 4.7 - Blocos Padrão a Utilizar para Formar Valor Nominal α pretendido.....	56
Tabela 4.8 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Sutas	62
Tabela 5.1 - Legenda dos Valores Medidos	65
Tabela 5.2 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza	73
Tabela 6.1 - Dados a Registrar para Calibrações de Níveis Eletrônicos e Respetiva Avaliação.....	84
Tabela 6.2 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Níveis Eletrônicos com Padrão de Referência o Autocolimador.....	86
Tabela 6.3 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Níveis Eletrônicos com Padrão de Referência o Sistema Interferómetro Laser <i>HP</i>	89
Tabela 7.1 - Especificações das Mesas Niveladoras do Fabricante Newport [14]	91
Tabela 7.2 - Especificações das Mesas Niveladoras do Fabricante Aerotech.....	93

Abreviaturas

AC	Autocolimador
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CMC	Capacidades de Medição e Calibração
E	Distância entre os Dois Cubos Retrorefletores do Refletor Angular
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty in Measurement</i>
HP	<i>Hewlett-Packard</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L2	Laboratório de Medições Angulares
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LCO	Laboratório de Comprimento
LNM	Laboratório Nacional de Metrologia
MR	Mesa Rotativa
NP	Norma Portuguesa
ONS	Organismos de Normalização Setorial
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPQ	Sistema Português da Qualidade
VM	Valor Medido
VR	Valor de Referência

Simbologia

ε	Erro de Medição
Y	Grandeza de Saída
X_i	Grandeza de Entrada
f	Função Modelo
q_j	Observações ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
\bar{q}	Média Aritmética das Observações
$s(q)$	Desvio-Padrão Experimental das Observações
$s^2(q)$	Variância Experimental das Observações
$u(x_i)$	Incerteza-Padrão
a^+	Limite Superior
a^-	Limite Inferior
$u(y)$	Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída
x_i	Estimativa da Grandeza de Entrada
c	Coefficiente de Sensibilidade
U	Incerteza de Medição Expandida
k	Fator de Expansão
ν_{ef}	Número de Graus de Liberdade Efetivos
y	Valor Medido
A_{ij}	Posições da Mesa Indexada
B_{ij}	Posições da Mesa Rotativa
C_{ij}	Número da Face do Polígono Padrão

Ψ	Desvio de Posição da Mesa Rotativa e Indexada
$\bar{\Psi}$	Média Aritmética do Desvio da Posição da Mesa Rotativa e Indexada
Y_i	Valor da Leitura Inicial do Autocolimador em Y
Y_f	Valor da Leitura Final do Autocolimador em Y
X_i	Valor da Leitura Inicial do Autocolimador em X
X_f	Valor da Leitura Final do Autocolimador em X
α	Valor Nominal
u_c	Incerteza Combinada
Σ	Desvio-Padrão

1 Introdução

A metrologia é a ciência da medição e suas aplicações. Esta abrange todos os aspetos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação [1].

A medição é o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser atribuídos a uma grandeza, sendo a grandeza a propriedade de um fenómeno de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência [1].

Para se conhecer algumas das características dos instrumentos de medição, recorre-se à calibração dos mesmos permitindo assim conhecer o erro de medição e respetiva incerteza associada a cada instrumento.

A calibração é uma operação, que num primeiro passo, sob condições específicas estabelece uma relação entre valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas. Num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação de forma a obter o resultado de medição de uma indicação [1].

Com os avanços científicos e tecnológicos, a implementação de novos instrumentos de medição conduz as empresas e instituições elevarem os seus padrões de qualidade e aumentarem as suas prestações de serviços. Neste contexto, pretende-se com a presente dissertação, analisar o estado da arte no que respeita a equipamentos de medição, analisar os serviços prestados relativamente à área metrológica de medições angulares, otimizar os processos de calibração existentes e o desenvolver um novo processo de calibração, o de níveis eletrónicos, abrindo-se assim as portas a um novo serviço a prestar aos clientes do Instituto Português da Qualidade (IPQ).

1.1 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem dois objetivos principais. O primeiro é o estudo do comportamento do equipamento de medição angular, autocolimador, em função da distância de feixe percorrido e da abertura ou largura do mesmo quando a medir pequenos desvios angulares. O segundo é o desenvolvimento de um novo processo de calibração de níveis eletrônicos.

Para a concretização destes objetivos foram realizadas as seguintes tarefas:

Tarefa A – Pesquisa bibliográfica

Tarefa B1 – Revisão do processo de calibração de óticas angulares, com a atualização do procedimento de medição e consequente avaliação da incerteza expandida de medição.

Tarefa B2 – Implementação do processo de calibração de sutas, com a Elaboração do procedimento de medição e consequente avaliação da incerteza expandida de medição.

Tarefa C – Calibrações de instrumentos de medição de ângulo: autocolimadores, incluindo estudos e análise dos resultados quando variamos o comprimento percorrido pelo feixe do autocolimador e a abertura do feixe.

Tarefa D – Estudo, desenvolvimento e implementação do processo de calibração de níveis eletrônicos.

Tarefa E – Síntese, análise e discussão dos resultados obtidos.

Tarefa F – Escrita da dissertação

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 8 capítulos:

O capítulo 1, designado de *Introdução*, apresenta o trabalho realizado e os seus objetivos.

O capítulo 2, denominado *Enquadramento*, dá a conhecer as estruturas da Metrologia, do Instituto Português da Qualidade, do Departamento de Metrologia e do Laboratório de Comprimento. Neste capítulo é feita também uma descrição do Sistema Internacional de Unidade com especial foco na unidade radiano.

O capítulo 3, intitulado *Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição*, descreve os princípios para avaliar o erro de medição e a incerteza expandida de medição.

O capítulo 4, chamado *Calibrações de Instrumentos de Medição de Ângulo*, descreve os padrões de medição e os acessórios complementares utilizados nas calibrações realizadas para esta dissertação. Descreve ainda todos os processos de calibração utilizados.

O capítulo 5, designado *Calibração de Autocolimadores*, apresenta o estudo do processo de calibração de autocolimadores implementado e a atualização do mesmo, tendo em conta o programa de execução da comparação internacional de autocolimadores, na qual o IPQ se encontra envolvido.

O capítulo 6, denominado *Projeto de Calibração de Níveis Eletrónicos*, apresenta a conceptualização do projeto em função dos seus requisitos, onde é descrito o estudo do equipamento a ser calibrado, o planeamento inicial e a solução do projeto.

O capítulo 7, chamado *Estudo de Mesas Niveladoras*, descreve possíveis soluções para a substituição da mesa niveladora do IPQ.

Para finalizar, o capítulo 8 intitulado *Conclusões* apresenta a conclusão dos diversos pontos considerados essenciais do trabalho.

2 Enquadramento

2.1 Metrologia

A metrologia fornece o apoio material fiável ao sistema de medições, fundamental nos setores da economia, da saúde, da segurança e do ambiente, constituindo uma infraestrutura tecnológica essencial nas sociedades modernas.

Assim, a missão do Departamento de Metrologia é a de certificar o rigor e a rastreabilidade das medições no território nacional, através dos padrões de medida necessários à indústria e à sociedade portuguesa em geral e contribuir para a construção de uma liderança metrológica europeia no quadro da economia mundial [2].

A metrologia está dividida em três áreas de atividade e responsabilidade (Figura 2.1).

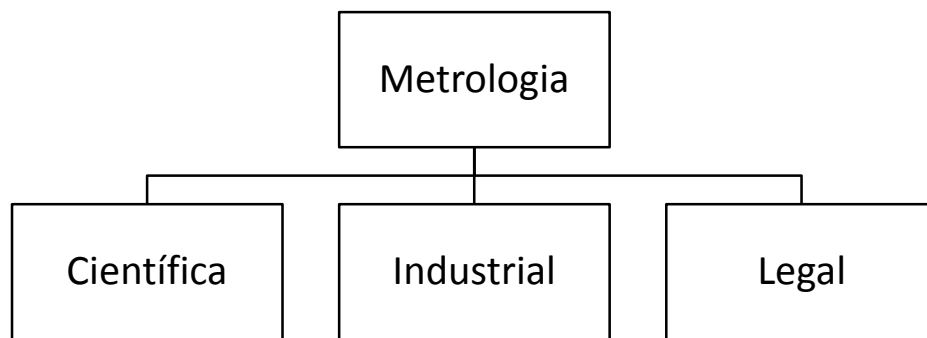


Figura 2.1 - Áreas da Metrologia

A metrologia científica tem como objetivo a definição das unidades de medida das grandezas de base e derivadas, a sua realização prática e o desenvolvimento de padrões de medição e a sua manutenção [3].

A metrologia industrial tem como objetivo certificar o funcionamento adequado dos instrumentos de medição utilizados na indústria, bem como nos processos de produção e ensaio [3].

A metrologia legal está relacionada com o controlo metrológico dos instrumentos de medição, execução e aplicação de diretivas e regulamentos relacionados com as medições e em especial com a exatidão das medições requeridas nas transações comerciais, saúde e segurança [3].

2.2 Instituto Português da Qualidade

O IPQ é um instituto público, integrado na administração indireta do Estado, com autonomia financeira, administrativa e património próprio, em que prossegue atribuições do Ministério da Economia [4].

O IPQ é responsável pela coordenação do Sistema Português da Qualidade (SPQ) e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei. O IPQ visa a promoção e a coordenação de atividades que contribuam para a demonstração da credibilidade da ação dos agentes económicos, bem como o desenvolvimento das atividades inerentes à sua função de laboratório nacional de metrologia.

No âmbito do SPQ, o IPQ é a instituição responsável em Portugal por [4]:

- a) Gerir, coordenar e desenvolver o SPQ, numa perspetiva de integração de todas as componente revelantes para a melhoria da qualidade de produtos, de serviços e de sistemas da qualidade e da qualificação de pessoas;
- b) Promover o desenvolvimento do SPQ, com vista ao incremento da qualidade, contribuindo para o aumento da produtividade, competitividade e inovação nos setores público e privado;
- c) Garantir e desenvolver a qualidade através do estabelecimento de protocolos e parcerias estratégicas com entidades públicas, privadas e da economia social, bem como com infraestruturas científicas e tecnológicas que, voluntariamente ou por inerência de funções, congreguem esforços para definir princípios e meios que tenham por objetivo padrões de qualidade;
- d) Promover e dinamizar comissões setoriais e outras estruturas da qualidade integradas no SPQ, preparando e gerindo o calendário das respetivas ações, encontros e reuniões;
- e) Instituir as marcas identificadoras do SPQ e assegurar a respetiva gestão;
- f) Garantir a realização e dinamização de prémios de excelência, como forma de reconhecimento e afirmação das organizações;
- g) Promover e desenvolver ações de formação e de apoio técnico no domínio da qualidade, designadamente no âmbito da qualificação, da normalização e da metrologia;
- h) Desenvolver atividades de cooperação e de prestação de serviços a entidades nacionais e estrangeiras interessadas no domínio da qualidade;
- i) Propor ao membro do Governo da tutela medidas conducentes à definição de políticas nacionais relativas ao SPQ no âmbito da normalização, qualificação e metrologia, nos domínios voluntário e regulamentar;

- j) Promover a elaboração de normas portuguesas e de documentos normativos, garantindo a coerência e atualidade do acervo normativo nacional;
- k) Qualificar e reconhecer como Organismos de Normalização Setorial (ONS) as entidades públicas ou privadas nas quais o IPQ, I. P., delegue funções de normalização técnica em setores de atividade específicos;
- l) Coordenar e acompanhar os trabalhos de normalização nacional desenvolvidos no âmbito da rede de ONS, comissões técnicas de normalização e outras entidades qualificadas no âmbito do SPQ;
- m) Assegurar e promover a representação e a participação de Portugal como membro das organizações, comités, grupos de trabalho e outras instâncias de âmbito europeu e internacional, no âmbito das suas atribuições e competências e as obrigações daí decorrentes;
- n) Gerir o sistema de notificação prévia de regulamentos técnicos e de normas, no âmbito da União Europeia e da Organização Mundial de Comércio, de acordo com a legislação aplicável;
- o) Promover o ajustamento da legislação nacional às normas nacionais, europeias e internacionais, nomeadamente assegurando a transposição de diretivas comunitárias na sua área de competências;
- p) Assegurar o cumprimento dos procedimentos das diretivas comunitárias no que diz respeito à qualificação, notificação à Comissão Europeia e manutenção atualizada da base de dados europeia dos organismos notificados no âmbito de cada diretiva;
- q) Acompanhar iniciativas e programas comunitários que tenham implicações no seu âmbito de atividade;
- r) Gerir o Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), nas suas componentes científica e aplicada, assegurando a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida e a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI), promovendo a disseminação dos valores das unidades SI no território nacional;
- s) Assegurar e gerir o sistema de controlo metrológico legal dos instrumentos de medição, reconhecer entidades competentes para o exercício delegado desse controlo, sempre que tal se revele necessário para garantir a efetiva cobertura a nível nacional, e coordenar a rede constituída por aquelas entidades;
- t) Assegurar a implementação, articulação e inventariação de cadeias hierarquizadas de padrões de medida, promover o estabelecimento de redes de laboratórios metrológicos acreditados e a realização de comparações interlaboratoriais nacionais;
- u) Assegurar a representação de Portugal como membro das organizações de metrologia europeias e internacionais e as obrigações daí decorrentes, nomeadamente a

participação nos respetivos trabalhos, a comparação de padrões, a rastreabilidade ao SI e em projetos de investigação e desenvolvimento;

- v) Gerir o Museu de Metrologia e promover a recolha, preservação, estudo e divulgação do espólio metrológico com interesse histórico [4].

2.3 Departamento de Metrologia

O IPQ, I. P., é o Organismo Nacional de Normalização e a Instituição Nacional de Metrologia. Uma das atribuições do IPQ, I. P., como referido na alínea anterior e decorrente do Decreto-Lei nº 71/2012 de 23 de Março, é a gestão do Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), nas suas componentes científicas e aplicada, assegurando a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida e a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI), promovendo a disseminação dos valores das unidades SI no território nacional [4].

O LNM é constituído por alguns dos seguintes domínios [4]:

- Fotometria, Radiometria e Radiofrequências;
- Comprimento e Ângulo;
- Quantidade de Matéria e Eletroquímica;
- Massa, Força e Pressão;
- Propriedades de líquidos;
- Temperatura e Humidade;
- Tempo e Frequência;
- Volume;
- Eletricidade e Acústica.

2.4 Laboratório de Comprimento

O Laboratório de Comprimento (LCO) é responsável pelo desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais de Comprimento e Ângulo Plano, incumbindo-lhe designadamente:

- A realização prática da definição de metro e radiano;
- Calibrações;
- A participação e coordenação de comparações interlaboratoriais;
- Apoiar a metrologia legal.

Este projeto foi desenvolvido na área de trabalho do LCO correspondente às Medições Angulares (L2 – Segundo a nomenclatura do IPQ), Figura 2.2.



Figura 2.2 - Foto do Laboratório de Medições Angulares (L2)

2.5 Sistema Internacional de Unidades

O Sistema Métrico Decimal criado em 1789 adotou, inicialmente, três unidades básicas de medida: o quilograma, o litro e o metro. Posteriormente, em 1960 o sistema métrico decimal foi designado de Sistema Internacional de Unidades (SI) pela 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), sendo atualmente constituído por sete unidades de base. O SI define os nomes, símbolos e definições das unidades, bem como os prefixos e símbolos dos múltiplos e submúltiplos das mesmas unidades e contempla ainda recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos [5].

O SI foi adotado em Portugal pelo Decreto-Lei nº 427/83, de 7 de Dezembro, revisto e alterado posteriormente, tendo sido presentemente atualizado pelo Decreto-Lei nº 128/2010 de 3 de Dezembro como o sistema legal de unidades de medida [5].

O SI¹ é constituído por:

- Unidades de base;
- Unidades derivadas.

As unidades de base são unidades bem definidas que, por convenção são consideradas como dimensões independentes: o metro, o quilograma, o segundo, o ampere, o kelvin, o mole e a candela [6].

Unidades derivadas são unidades que podem ser expressas a partir das unidades de base dadas por expressões algébricas sob a forma de produtos de potência das unidades SI de base com um fator numérico igual a 1. Os nomes e símbolos de algumas das unidades assim formados podem ser substituídos por nomes e símbolos especiais, que eles próprios podem ser utilizados para formar as expressões e símbolos de outras unidades derivadas. O radiano é um dos exemplos das unidades derivadas do SI [6].

¹ 20ª CGPM de 1995, Resolução nº8, BIPM

2.5.1 Radiano

A unidade do SI da grandeza derivada ângulo plano é o radiano (**rad**) [5].

O radiano é o ângulo plano compreendido entre dois raios que, na circunferência de um círculo, intersectam um arco de comprimento igual ao raio desse círculo, (Figura 2.3).

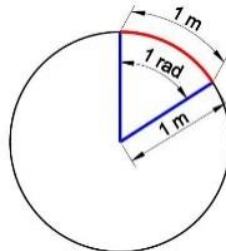


Figura 2.3 - Radiano Unidade da Grandeza Derivada Ângulo Plano

O Ângulo Plano é a grandeza em avaliação nas calibrações de equipamentos de medição angulares no L2. A realização prática da definição do ângulo plano é definida em termos da subdivisão de um círculo. Um círculo completo corresponde a 2π rad mas devido ao facto de π ser um número indivisível as unidades normalmente utilizadas em metrologia angular pertencem ao sistema sexagesimal, grau ($^{\circ}$), minuto ($'$) e segundo ($''$).

A Tabela 2.1 apresenta os nomes e símbolos especiais autorizados de múltiplos e submúltiplos não decimais da grandeza ângulo plano:

Tabela 2.1 - Múltiplos e Submúltiplos não Decimais da Grandeza Ângulo Plano [5]

Grandeza	Unidade		
	Nome	Símbolo	Valor em unidade SI
Ângulo Plano	Grau	$^{\circ}$	$1^{\circ} = \left(\frac{\pi}{180}\right) rad$
	Minuto	$'$	$1' = \left(\frac{1}{60}\right)^{\circ} = \left(\frac{\pi}{10\ 800}\right) rad$
	Segundo	$''$	$1'' = \left(\frac{1}{60}\right)' = \left(\frac{\pi}{648\ 000}\right) rad$

Para a realização prática da definição do ângulo plano, o IPQ possui padrões de ângulo, nomeadamente um autocolimador (sistema ótico com capacidade de medir ângulos pequenos ou

inclinações do espelho refletor) e uma mesa indexada (sistema que permite gerar posições angulares) e cujas especificações técnicas são apresentadas nos capítulos seguintes.

O método de medição, normalmente utilizado consiste no facto de que a soma de todos os ângulos intermédios de um círculo, quaisquer que sejam os seus erros, ter de ser 360° e de a soma de todos os erros das mesmas subdivisões ter de ser zero. A partir deste conhecimento é possível gerar todo o conjunto de equações necessárias para determinar o erro de cada subdivisão angular do círculo.

3 Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição

A medição é o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente atribuídos a uma grandeza [1].

O resultado da medição é apenas uma aproximação ou uma estimativa do valor da mensuranda, porque sempre que se efetua uma medição, existe um erro associado ao valor medido. Esse erro de medição é a diferença entre o valor medido (VM), e um valor de referência (VR) de uma grandeza dado pela equação [1]:

$$\varepsilon = VM - VR \quad \text{Equação 3.1}$$

O conceito de “erro de medição” pode ser utilizado quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração é efetuada por meio de um padrão de medição cuja incerteza de medição é desprezável, ou se é dado um valor convencional, neste caso o erro é conhecido. Este conceito também pode ser utilizado se se supuser que a mensuranda é representada por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável, neste caso o erro de medição é desconhecido [1].

Para o erro de medição contribuem dois tipos de erros: o erro sistemático e o erro aleatório.

O erro sistemático é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. O valor de referência para o erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido de um padrão com incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. O erro sistemático e as suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Deve-se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido [1].

O erro aleatório é a outra componente que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O valor de referência para o erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser condensada pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo nula, e pela sua variância [1].

3.1 Incerteza de Medição

A expressão de um resultado de medição só está completa quando contém o valor atribuído à mensuranda e a incerteza de medição associada a esse valor [7].

A incerteza de medição é o parâmetro não negativo que qualifica a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações usadas. Esta inclui componentes provenientes

de efeitos sistemáticos, tais como componentes associados a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional. Por vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados mas, em vez disso, são incluídas componentes de incerteza de medição associadas. Em geral, para um certo conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído à mensuranda. Uma alteração deste valor resulta numa modificação da incerteza associada [1].

Para se calcular a estimativa de incerteza, geralmente usa-se o procedimento descrito pelo GUM [7] de acordo com os passos seguintes:

- Expressar em termos matemáticos a dependência da mensuranda Y em relação às grandezas de entrada x_i ;
- Listar todas os componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A ou B);
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente da incerteza;
- Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
- Avaliar a necessidade de cálculo de covariâncias;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão k ;
- Determinar a incerteza expandida;

A mensuranda é a grandeza submetida à medição. Em regra, na calibração de equipamentos, trabalha-se apenas com uma única mensuranda ou grandeza de saída Y que depende de um certo número de grandezas de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), de acordo com a seguinte relação:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 3.2}$$

3.2 Avaliação da Incerteza de Medição das Grandezas de Entrada

As grandezas de entrada X_i têm um valor de incerteza associada, que podem ser determinadas diretamente na medição, por exemplo, de uma simples observação, de observações repetidas, da avaliação baseada na experiência ou então podem ser provenientes de origens externas à medição, tais como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados [7].

A incerteza de medição associada às estimativas das grandezas de entrada é avaliada de acordo com o método de avaliação “Tipo A” ou “Tipo B”.

3.2.1 Avaliação de Tipo A

A avaliação de Tipo A é a avaliação de uma componente da incerteza de medição por meio de análise estatística dos valores medidos alcançados em condições de medição especificadas. Este tipo de componente de incerteza é obtido através do cálculo do desvio padrão $s(\bar{q})$ [7]:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 3.3}$$

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$u(x_i) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 3.6}$$

Em que:

$s^2(q)$ – Variância Experimental da Média;

$s(q)$ – Desvio Padrão;

n – Número de Observações;

\bar{q} – Média Aritmética dos Valores Individualmente Observados q_j ($j = 1, 2, \dots, n$).

3.2.2 Avaliação de Tipo B

A incerteza-padrão associada $u(x_i)$ é avaliada por análise científica em toda a informação disponível sobre a variabilidade possível de X_i . A esta categoria pertencem valores provenientes de [7]:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento da mensuranda da instrumentação, das propriedades de materiais e das técnicas de medição;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Especificações de fabricantes;
- Incertezas atribuídas a dados de referência obtidas em manuais ou outras publicações;

Para o cálculo de incertezas do Tipo B o GUM [7] indica um procedimento que consiste em admitir uma distribuição de probabilidade para a grandeza X_i tais como: Distribuição Normal, Distribuição Retangular ou Distribuição Triangular.

3.2.2.1 Distribuição Normal

A distribuição normal (Figura 3.1) é uma distribuição de probabilidade contínua, que descreve as variáveis aleatórias independentes e frequência relativamente à magnitude dos valores de medição. Este tipo de distribuição é normalmente utilizada na avaliação da incerteza de medição do Tipo A, embora exista casos de utilização na avaliação do Tipo B quando existe informação de que os valores da grandeza de entrada X_i se encontram mais centrais em relação aos valores limite [7].

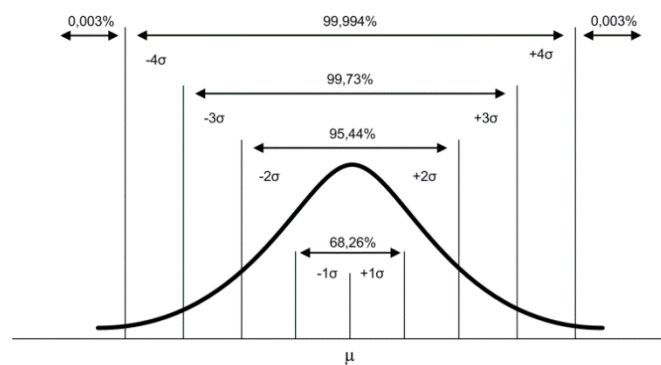


Figura 3.1 - Distribuição Normal [8]

3.2.2.2 Distribuição Retangular

A distribuição retangular ou uniforme (Figura 3.2) é uma distribuição cuja probabilidade é constante em intervalos da mesma dimensão. Esta é utilizada na situação de conhecimento insuficiente da grandeza de entrada X_i , assumindo-se que apenas se conhece os seus limites de variabilidade, a^- e a^+ . A incerteza-padrão é expressa pela equação [7]:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 3.7}$$

No caso de a diferença entre os valores limite for $2a$, a equação da incerteza-padrão será:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 3.8}$$

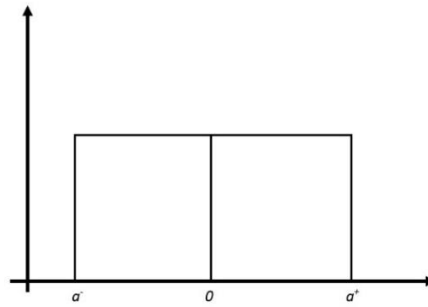


Figura 3.2 - Distribuição Retangular

3.2.2.3 Distribuição Triangular

Se conhecidos *a priori* os valores centrais da grandeza estes são mais prováveis que os valores limite, deverá ser utilizada uma distribuição triangular, (Figura 3.3). A incerteza-padrão será então definida pela equação [7]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad \text{Equação 3.9}$$

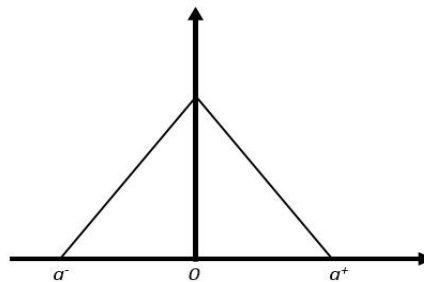


Figura 3.3 - Distribuição Triangular

3.2.3 Incerteza-Padrão da Mensuranda

No caso das grandezas de entrada não estarem correlacionadas entre si, a incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y é dado por [7]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 3.10}$$

A grandeza $u_i(y)$ é a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa de grandeza de saída y , resultando do produto da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada, x_i , pelo coeficiente de sensibilidade c_i .

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \text{Equação 3.11}$$

Em que:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 3.12}$$

Quando há correlação entre as grandezas de entrada, deve-se ter em conta as covariâncias associadas, considerando-as como uma contribuição adicional para a incerteza. A lei de propagação de incerteza para estes casos é dada por [7]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1/2 c_{ij}^2 + c_{ij}) u^2(x_i) u^2(x_j)$$

$$\text{Equação 3.13}$$

3.2.4 Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida U , obtém-se mediante a multiplicação da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um fator de expansão, k [7].

$$U = k u(y) \quad \text{Equação 3.14}$$

O fator de expansão k , corresponde a uma determinada probabilidade expandida tendo em conta a fiabilidade da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída y . O procedimento de cálculo do fator de expansão k é efetuado através da determinação do número de graus de liberdade efetivos, ν_{ef} , da estimativa da grandeza de saída y dependente da amostra utilizada (Tabela 3.1).

De acordo com o GUM [7], o número de graus de liberdade efetivos da incerteza padrão da estimativa da grandeza de saída y é calculado pela fórmula de *Welch-Satterhwaite*:

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad \text{Equação 3.15}$$

Em que $u_i(y)$ definidos pela equação anterior são as contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída y , resultante das incertezas padrão das estimativas de entrada x_i , assumidas serem

estatisticamente e mutuamente independentes e v_i o número de graus de liberdade efetivos da componente de incerteza-padrão $u_i(y)$.

Para uma avaliação do Tipo A, o número de graus de liberdade é dado por $v_i=n-1$. No caso de a avaliação ser do Tipo B, é mais problemático calcular o número de graus de liberdade. Assim, sempre que possível considera-se os graus de liberdade da incerteza padrão $u(x_i)$ como sendo $v_i \rightarrow \infty$ para uma distribuição de probabilidades retangular.

O fator de expansão k é obtido a partir da Tabela 3.1 que se baseia numa distribuição *t-student* para a probabilidade expandida de 95,45%. Se v_{ef} calculado não for inteiro, truncar v_{ef} para o inteiro imediatamente inferior.

Tabela 3.1 - Fatores de Expansão k para Diferentes Números de Graus de Liberdade Efetivos v_{ef}

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Quando se considera a incerteza-padrão associada à utilização de padrões ou de instrumentos de medição calibrados, e quando no certificado de calibração não indique o número de graus de liberdade efetivos da calibração, mas somente para o fator de expansão $k=2$, deve-se assumir um número de graus de liberdade efetivos igual a 50.

3.2.5 Resultado da Incerteza de Medição

Na realização da calibração de equipamentos de medição, o resultado completo da medição a ser apresentado no certificado de calibração, consiste na estimativa y da mensuranda e na incerteza expandida associada U expresso na forma [7]:

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 3.16}$$

Por norma, deverá apresentar-se uma nota adicional com o seguinte conteúdo:

“A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k = x,xx$, a qual para uma distribuição-t com $v_{ef} = y$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de $xx\%$, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections).

4 Calibrações de Instrumentos de Medição de Ângulo

Em vários ramos e atividades da sociedade humana é necessário medir distâncias ou ângulos. A suta (Figura 4.1) é um exemplo de instrumentos de medição que permite fazer medições de ângulos planos.



Figura 4.1 - Suta com Sistema de Leitura Analógica

De modo a garantir que este instrumento esteja de acordo com as especificações técnicas é necessário verificar o seu funcionamento e se os valores que com ele são medidos estão dentro da gama dos valores admitidos como erro máximo admissível, ou se está de acordo com as especificações metrológicas.

É neste contexto que surge o controlo metrológico, nomeadamente a calibração [1], “operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas de medição associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação”. Para se conhecer os erros associados à suta é assim fundamental a realização da calibração deste tipo de instrumento de medição.

Este capítulo visa apresentar a descrição dos padrões de medição utilizados, os procedimentos experimentais e as fontes de incerteza dos seguintes processos de calibração realizados:

- Calibração de Mesas Indexadas e/ou Rotativas;
- Calibração de Blocos Padrão Angulares;
- Calibração de Óticas Angulares de Sistemas Interferométricos;
- Calibração de Sutas.

4.1 Padrão de Medição

Padrão de medição significa a realização de uma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência [1].

Na elaboração das diversas calibrações anteriormente referidas, foram utilizados dois tipos de padrões de medição: o padrão de medição de referência e o padrão de medição de trabalho.

4.1.1 Padrão de Medição de Referência

Um padrão de medição serve frequentemente de referência na obtenção de valores medidos e incertezas de medição associadas para outras grandezas da mesma natureza, estabelecendo assim uma rastreabilidade metrológica através da calibração de outros padrões de medição, instrumentos de medição ou sistemas de medição [1].

Os equipamentos utilizados como padrão de medição de referência foram os seguintes:

- Autocolimador;
- Sistema Interferométrico Laser *HP*;
- Blocos Padrão Angulares.

4.1.1.1 Autocolimador

O autocolimador (Figura 4.2) é um sistema ótico, capaz de medir pequenas variações ou diferenças de posições angulares [9].



Figura 4.2 - Autocolimador ELCOMAT HR da Möeller-Wedel

O princípio de medição usado é a autocolimação. Um objeto iluminado, pelo feixe do autocolimador, no plano focal da lente colimadora, é refletido num espelho e a imagem é formada num recetor sensível à luz.

Uma pequena deflexão entre o eixo ótico do autocolimador e o espelho causa uma variação de ângulo sendo esta detetada com uma exatidão elevada, pelo sistema autocolimador, (Figura 4.3).

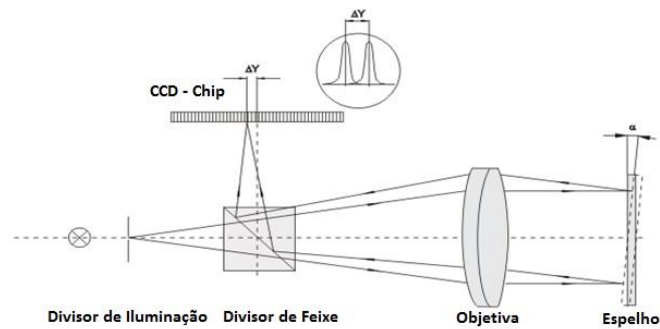


Figura 4.3 - Princípio de Medição de um Autocolimador

O autocolimador, modelo ELCOMAT HR (Figura 4.2), do IPQ tem amplitude de medição de $\pm 150''$ e resolução de $0,01''$.

4.1.1.2 Sistema Interferométrico Laser *HP*

Os interferômetros lasers são sistemas utilizados em metrologia dimensional para realizar uma variedade de medições lineares e angulares. É um sistema de medição portátil, que pode fazer as seguintes medições [10]:

- Distância;
- Velocidade;
- Deslocamento angular;
- Nivelamento;
- Linearidade;
- Perpendicularidade;
- Paralelismo.

O Sistema Interferométrico Laser HP quando composto pelos componentes óticos: interferômetro angular (Figura 4.4 (a)) e refletor angular (Figura 4.4 (b)) e pela unidade laser (Figura 4.4 (1)), permite a medição de desvios angulares. O resultado de medição obtido corresponde à medição do movimento angular relativo entre o refletor angular e o interferômetro angular quando o refletor angular é deslocado [10].

O Sistema de Interferômetro Laser HP modelo 5518A do IPQ, tem amplitude de medição de $\pm 36000''$ e resolução de $0,1''$.

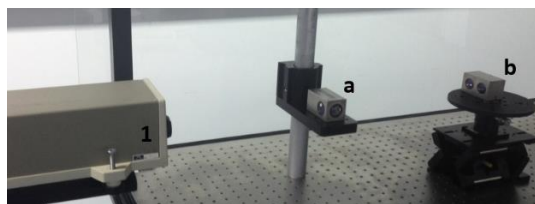


Figura 4.4 - Sistema Interferométrico Laser HP Composto pela Unidade Laser (1), Interferômetro Angular (a) e Refletor Angular (b).

4.1.1.3 Blocos Padrão Angulares

Blocos padrão são padrões de comprimento ou ângulo (Figura 4.5), corporificados através de duas faces específicas de um bloco, ditas “faces de medição”, sendo que estas faces apresentam uma planicidade e acabamento superficial que tem propriedades de se aderir a outra superfície com a mesma qualidade, por atração molecular [11].

A principal característica destes padrões está associada aos pequenos erros de ângulo plano, que são obtidos no processo de fabricação dos mesmos.

Os materiais mais utilizados no fabrico destes são: o aço de liga tratado, o carboneto de tungstênio e a cerâmica [11].



Figura 4.5 - Exemplo de Blocos Padrão Angulares

4.1.2 Padrão de Medição de Trabalho

O padrão de medição de trabalho é utilizado com frequência para calibrar ou controlar instrumentos de medição ou sistemas de medição [1].

Os equipamentos utilizados como padrão de medição de trabalho foram os seguintes:

- Mesa Rotativa TEKNIKER;
- Polígono.

4.1.2.1 Mesa Rotativa Tekniker

Sistema com um “Encoder” rotativo de exatidão muito elevada, posicionado sobre uma mesa suportada e orientada através de um dispositivo de apoio pneumático, garantindo uma rotação exata e sem atrito. A rotação desta mesa é acionada, em primeiro lugar, por um motor de corrente contínua, que transmite o movimento através de um dispositivo mecânico de fricção. Uma vez colocada dentro do limite da capacidade definido, o posicionamento final, de elevada exatidão da mesa é efetuado através de um atuador piezoelétrico e de um mecanismo de flexão [12].

Esta mesa rotativa (Figura 4.6) é composta por dois elementos: o conjunto mecânico da mesa rotativa propriamente dito e o sistema de controlo da mesma.

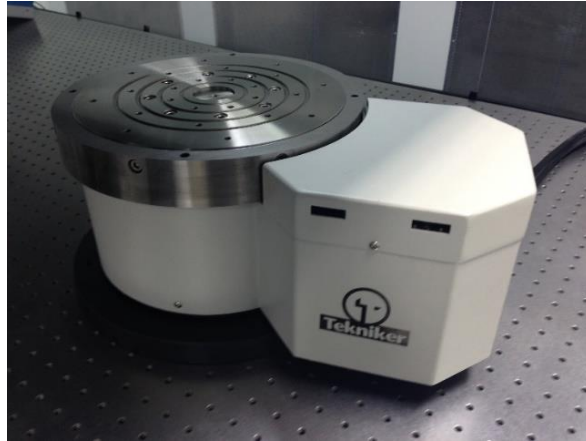


Figura 4.6 - Mesa Rotativa Tekniker

4.1.2.2 Polígono

Os polígonos são medidas materializadas de ângulo plano. Os polígonos espelhados são um exemplo dos mesmos e podem ser usados como padrões angulares para calibrações, de outros padrões de ângulo, nomeadamente para determinar a exatidão de deslocamento angular de mesas rotativas [13].

O polígono utilizado (Figura 4.7) na calibração de mesas rotativas e indexadas foi um polígono de 9 faces.



Figura 4.7 - Polígono Padrão Angular de 9 Faces

4.2 Acessórios Complementares

4.2.1 Mesa Niveladora

Mesa niveladora Newport, modelo M-PO46BD (Figura 4.8), que possibilita rotação do plano XY segundo o eixo Z, e inclinações segundo os eixos X e Y [14].

A Tabela 4.1 apresenta as suas especificações técnicas.

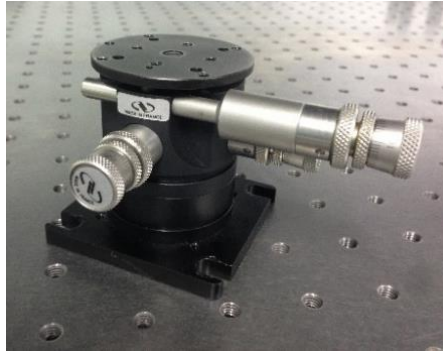


Figura 4.8 - Mesa Niveladora Newport

Tabela 4.1 - Especificações Técnicas da Mesa Niveladora Modelo M-PO46BD-75 [14]

Modelo	M-PO46BD-75
Amplitude de Inclinação (Grau)	$\pm 7,5^{\circ}$
Rotação (Grau)	$\pm 2,5^{\circ}$
Resolução (Grau)	2°
Sensibilidade (Arco-Segundo)	3"
Carga Máxima (N)	50 N

4.2.2 "AC-Finder Prism"

O prisma "AC-Finder Prism", (Figura 4.9), é um sistema projetado para facilitar o alinhamento de espelhos em relação ao eixo dos autocolimadores e para distâncias curtas [15].



Figura 4.9 - "AC-Finder Prism"

4.2.3 Base de Fixação

A base de fixação, (Figura 4.10), é utilizada para fixar a mesa niveladora à mesa rotativa, através de parafusos correspondendo a uma interface de ligação de componentes.

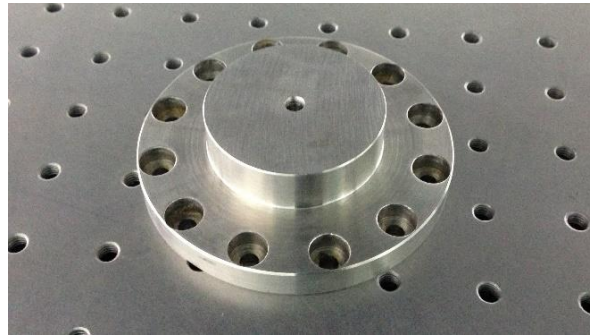


Figura 4.10 - Base de Fixação

4.2.4 Elevadores e Plataformas com Ajuste Micrométrico

Os elevadores e plataformas com ajuste micrométrico foram os seguintes [14]:

- Haste com plataforma de altura ajustável Newport, (Figura 4.11 (a)), com deslocamento vertical de 300 mm.
- Elevador modelo 271 da Newport, (Figura 4.11 (b)), com deslocamento vertical de 45 mm.



a)



b)

Figura 4.11 - Haste com Plataforma de Altura Ajustável Newport (a) e Elevador Vertical Newport, Modelo 271 (b)

4.2.5 Plano Ótico

O plano ótico (Figura 4.12) é utilizado como equipamento de apoio na calibração de sutas e blocos angulares devido ao seu acabamento superficial que permite uma base de referência plana.



Figura 4.12 - Plano Ótico

4.2.6 Nível de Bolha

Equipamento que permite medir pequenas inclinações e utilizado nas calibrações como equipamento de apoio para indicar apenas medidas qualitativas. O nível de bolha utilizado, (Figura 4.13), tem resolução horizontal de 0,05 mm/m e resolução vertical de 0,4 mm/m.



Figura 4.13 - Nível de Bolha com Resolução Horizontal e Vertical de Respetivamente 0,05 mm/m e 0,4 mm/m

4.2.7 Mesa Indexada

Dispositivo que permite gerar as posições angulares para valores discretos.

As mesas indexadas são constituídas por dois pratos circulares concêntricos com o mesmo diâmetro e com o mesmo número de «dentes», que se engrenam, impedindo todas as rotações ou outros movimentos lineares entre si.

A passagem de uma posição angular a uma outra, ou seja o gerar de um ângulo, efetua-se por libertação do engrenamento anterior, seguindo-se uma rotação do prato superior, no valor do ângulo pretendido.

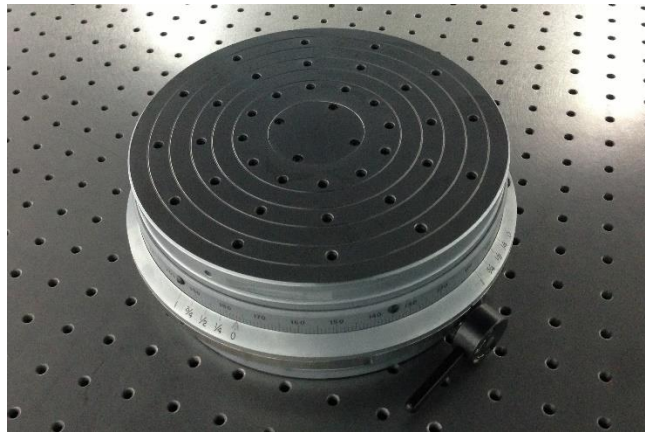


Figura 4.14 - Mesa Indexada

4.2.8 Sistema de Aquisição de Temperaturas

Uma das condições estipuladas de funcionamento é a de que a calibração de um equipamento só deve ser realizada se a temperatura ambiente do laboratório for de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e a variação da temperatura, for $< 1 ^\circ\text{C}$ durante, no mínimo, 3 horas [16].

O sistema de aquisição de temperaturas utilizado nas diversas calibrações foi o Opus 10 da marca Lufft (Figura 4.15) com resolução de $0,2^\circ\text{C}$.



Figura 4.15 - Sistema de Aquisição de Temperaturas Opus 10 da Lufft

4.3 Processos de Calibração

Este subcapítulo visa apresentar a descrição do método e da sequência a usar para a calibração de:

- Mesas Indexadas e/ou Rotativas e Polígonos Padrão [17];
- Blocos Padrão Angulares usando a Mesa Rotativa e o Autocolimador [9];
- Óticas Angulares de Sistemas Interferométricos [18];
- Sutas utilizando Blocos Padrão Angulares (Processo a implementar).

Todos os processos de calibração estão de acordo com a norma NP EN ISO/IEC 17025 - *Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração*, os resultados da calibração de um equipamento de medição são expressos num certificado de calibração, o qual deverá incluir o especificado na alínea 5.10.2 Relatórios de ensaio e certificados de calibração desta norma. O certificado de calibração permite conhecer o erro de medição e a consequente verificação da adequação do equipamento para as medições que se pretende realizar, bem como saber se esses valores estão dentro do seu erro máximo admissível, especificado pelo fabricante.

4.3.1 Calibração de Mesas Indexadas/Rotativas e Polígonos Padrão

A grandeza em avaliação é o ângulo plano e o parâmetro em avaliação é o erro de medição da posição angular gerada pela mesa.

Os equipamentos necessários para esta calibração são os seguintes:

- Autocolimador ELCOMAT HR;
- Polígono
- “AC-Finder Prism”;
- Mesa Niveladora;
- Base de Fixação;
- Elevador e Plataformas com Ajuste Micrométrico;
- Nível de Bolha.

Os equipamentos a calibrar são os seguintes:

- Mesa Rotativa Tekniker;
- Mesa Indexada;
- Polígono Padrão Angular.

4.3.1.1 Verificações Iniciais

1. Verificar a pressão de ar comprimido da mesa rotativa e funcionamento da mesma;
2. Verificar se o certificado de calibração dos padrões está em vigor;

4.3.1.2 Medidas de Segurança a Respeitar

1. Usar luvas;

4.3.1.3 Descrição do Equipamento a Utilizar

4.3.1.3.1 Colocação da Mesa Rotativa Tekniker em Funcionamento

A sequência a seguir para ligar o sistema mesa rotativa deverá ser a seguinte:

1. Verificar que dispõe de ar comprimido nas condições especificadas à entrada do quadro elétrico;
2. Certificar que o potenciômetro “*DC OFFSET*” situado na rack - módulo PI (módulo *HVPZT Amplifier*) está situado no topo do sentido inverso aos ponteiros do relógio;
3. Colocar o comutador, localizado na frente do quadro, na posição 1;
4. Verificar se o sistema de ventilação do computador funciona corretamente;
5. Abrir a comporta do computador e premir o botão de acionamento do mesmo;
6. Fechar a comporta do PC e a porta da “*Rack*”;
7. Ligar o monitor;
8. Iniciar aplicação “*INDEXTABLE.exe*”
9. Certificar de que o indicador de pressão correspondente ao pressóstato possui cor verde. Caso contrário selecionar a ordem de troca de pressão para a pressão nominal de trabalho.

Nota: Uma vez realizada esta sequência, é necessário esperar aproximadamente 15 minutos antes de realizar operações sobre a mesa ou executar ordens de rotação da mesma. Caso a mesa rotativa tenha permanecido durante um longo período de tempo sem pressão de ar, será necessário aguardar pelo menos 30 a 60 minutos antes de iniciar o comando de posicionamento da mesa.

Nota 2: A temperatura máxima à qual poderá operar o equipamento é de 30° C. Não deverá ser ultrapassada a carga máxima de 50 kg a aplicar sobre a mesa.

Nota 3: A sequência acima foi descrita para utilização da mesa rotativa L2 do IPQ.

4.3.1.3.2 Medição com o Autocolimador, ELCOMAT HR

O autocolimador ELCOMAT HR, tem dois eixos de medição, X e Y, possui uma gama de medição de 300" e uma resolução do dispositivo afixador de 0,01".

Este sistema é composto pela cabeça de medição do autocolimador, AC, e por uma unidade de controlo, que permite a leitura dos ângulos nos eixos X e Y .

Depois de ligado o sistema, é visualizado na unidade de controlo:

“AC SELECT FUNCTION”

Para ativar os programas individuais, pressionar uma vez a tecla do programa pretendido. Para sair do programa, pressionar novamente a mesma tecla.

Para inicializar as medições deverá ser pressionada a tecla de programa *“ALIGN”*.

Ao ser pressionada esta tecla, se a superfície refletora, a ser avaliada, não estiver alinhada com o AC, surge a seguinte mensagem na unidade de controlo: *“NO SIGNAL on X”*.

Para visualizar o estado do eixo Y, deverá ser pressionada a tecla *“NEXT”*, e caso este eixo também não se encontre alinhado surge a mensagem: *“NO SIGNAL on Y”*. Para voltar a visualizar a informação referente à indicação do eixo X, pressionar a tecla *“LAST”*.

Num primeiro alinhamento do conjunto “polígono – autocolimador” é necessário utilizar o *“AC-Finder Prism”*, (Figura 4.16). Este componente ótico permite a visualização do estado de alinhamento entre a superfície refletora do padrão angular (polígono) e o autocolimador. (O conjunto encontra-se alinhado quando as duas imagens, visualizadas através do *“AC-Finder Prism”*, se encontram sobrepostas).

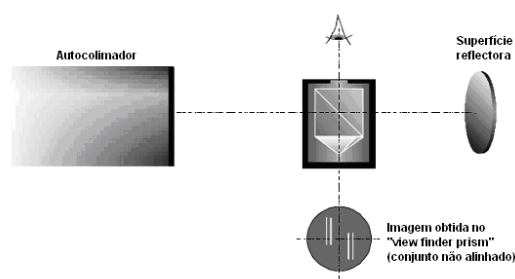


Figura 4.16 - Esquema da Utilização do *“AC-Finder Prism”*

Após a visualização do nível de alinhamento, com a utilização dos micrómetros dos elevadores de posicionamento do autocolimador é possível efetuar o alinhamento do eixo X.

Recorrendo aos micrómetros de elevação vertical presentes nos elevadores de posicionamento e aos micrómetros da mesa niveladora, é possível alinhar o eixo Y.

Nota: Antes de se iniciar as medições, o autocolimador deve permanecer pelo menos uma hora ligado para estabilizar.

4.3.1.4 Modo Operatório

No laboratório é preparada a montagem dos padrões de trabalho, padrões a calibrar e respectivos acessórios de acordo com o apresentado na figura seguinte:

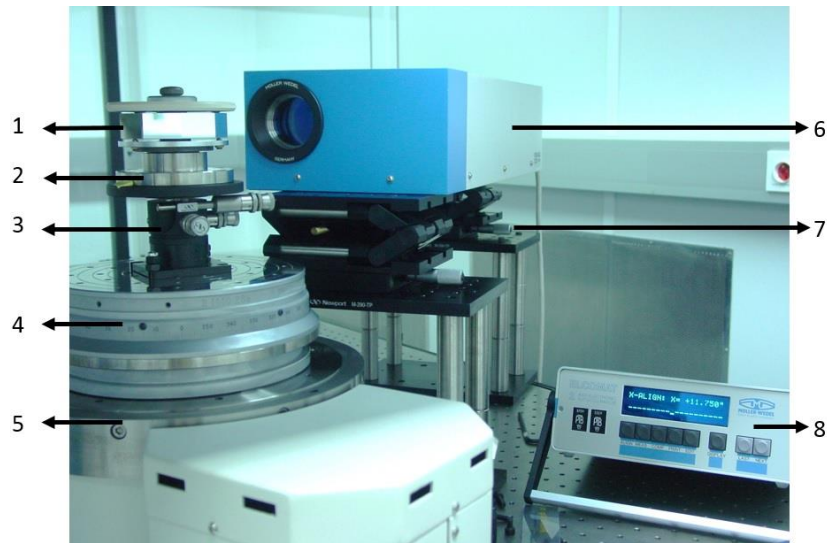


Figura 4.17 - Esquema para a Calibração de Mesas Rotativas e Indexadas

Legenda da Figura 4.17:

1. Polígono;
2. Base de Fixação;
3. Mesa Niveladora;
4. Mesa Indexada;
5. Mesa Rotativa;
6. Autocolimador;
7. Elevador com Plataforma com Ajuste Micrométrico;
8. Torre de Controle do Autocolimador.

Sequência de montagem demonstrada na Figura 4.17:

1. Colocar o autocolimador sobre a plataforma, com ajuste micrométrico, dos elevadores;
2. Colocar concentricamente a mesa indexada sobre a mesa rotativa;
3. Colocar a mesa niveladora sobre mesa indexada;
4. Nivelar a mesa niveladora com o nível de bolha;
5. Acoplar sistema de fixação à mesa niveladora para colocar polígono;
6. Colocar de modo concêntrico, o polígono padrão, usando para isso os parafusos próprios de fixação, com uma das faces do polígono perpendicular ao eixo ótico do autocolimador.

4.3.1.5 Minimizar o Erro Piramidal

1. Verificar a indicação do autocolimador em X, quando o polígono se encontra com a face 0° perpendicular ao eixo do autocolimador;
2. Ajustar a posição do polígono de modo a que a indicação do autocolimador em X esteja próxima de zero;
3. Verificar a indicação do autocolimador em Y;
4. Ajustar essa indicação para valores próximos de zero deslocando verticalmente a parte de trás do autocolimador, através dos parafusos de ajuste do elevador do autocolimador.
5. Rodar a mesa indexada de 180° ;
6. Verificar se a indicação referente ao eixo Y está próxima de zero.

Quando a diferença de indicação para o eixo Y entre as posições 0° e 180° for próxima de zero, inicializar o mesmo procedimento agora entre as posições 90° e 270° e minimizar a diferença de indicação registada no eixo Y. Alinhar a mesa niveladora/autocolimador até minimizar ao máximo a diferença entre o valor do eixo Y registado para as faces de medição do polígono padrão.

4.3.1.6 Procedimento Experimental

Este processo de calibração permite a calibração simultânea da mesa rotativa, da mesa indexada e do polígono padrão em questão (*cross calibration method*).

Como procedimento de cálculo irá ser construída uma matriz em que:

- O número de linhas será igual ao número de faces do polígono;
- O número de colunas será igual ao número de faces do polígono mais uma, sendo esta última coluna representativa do cálculo matemático a aplicar, conforme o descrito neste procedimento.

Segue-se o procedimento a realizar para a primeira coluna da matriz:

1. Colocar a mesa rotativa e mesa indexada na posição zero;
2. Posicionar a face 1 do polígono perpendicular ao eixo ótico do autocolimador e alinhar de modo a que o valor X do autocolimador seja zero;
3. Rodar a mesa indexada no valor de $360^\circ/n$, sendo n o número de faces do polígono.
4. Registrar a indicação em X do autocolimador
5. Rodar a mesa indexada no valor de $360^\circ/n$, sendo n o número de faces do polígono.
6. Registrar a indicação em X do autocolimador

Repetir os passos anteriores para todas as faces do polígono.

Segue-se o exemplo da matriz (Tabela 4.2) do procedimento a seguir para o processo de calibração com polígono padrão de 6 faces.

Tabela 4.2 - Matriz Procedimento na Calibração de Mesas Rotativas e Indexadas

ψ_k

A1+B1+C1 A1 = 0° B1 = 0° C1 = face 1	A6+B2+C1 A6 = 300° B2 = 60° C1 = face 1	A5+B3+C1 A5 = 240° B3 = 120° C1 = face 1	A4+B4+C1 A4 = 180° B4 = 180° C1 = face 1	A3+B5+C1 A3 = 120° B5 = 240° C1 = face 1	A2+B6+C1 A2 = 60° B6 = 300° C1 = face 1	ψ_1
A2+B1+C2 A2 = 60° B1 = 0° C2 = face 2	A1+B1+C2 A1 = 0° B1 = 60° C2 = face 2	A6+B1+C2 A6 = 300° B1 = 120° C2 = face 2	A5+B1+C2 A5 = 240° B1 = 180° C2 = face 2	A4+B1+C2 A4 = 180° B1 = 240° C2 = face 2	A3+B1+C2 A3 = 120° B1 = 300° C2 = face 2	ψ_2
A3+B1+C3 A3 = 120° B1 = 0° C3 = face 3	A2+B1+C3 A2 = 60° B1 = 60° C3 = face 3	A1+B1+C3 A1 = 0° B1 = 120° C3 = face 3	A6+B1+C3 A6 = 300° B1 = 180° C3 = face 3	A5+B1+C3 A5 = 240° B1 = 240° C3 = face 3	A4+B1+C3 A4 = 180° B1 = 300° C3 = face 3	ψ_3
A4+B1+C4 A4 = 180° B1 = 0° C4 = face 4	A3+B1+C4 A3 = 120° B1 = 60° C4 = face 4	A2+B1+C4 A2 = 60° B1 = 120° C4 = face 4	A1+B1+C4 A1 = 0° B1 = 180° C4 = face 4	A6+B1+C4 A6 = 300° B1 = 240° C4 = face 4	A5+B1+C4 A5 = 240° B1 = 300° C4 = face 4	ψ_4
A5+B1+C5 A5 = 240° B1 = 0° C5 = face 5	A4+B1+C5 A4 = 180° B1 = 60° C5 = face 5	A3+B1+C5 A3 = 120° B1 = 120° C5 = face 5	A2+B1+C5 A2 = 60° B1 = 180° C5 = face 5	A1+B1+C5 A1 = 0° B1 = 240° C5 = face 5	A6+B1+C5 A6 = 300° B1 = 300° C5 = face 5	ψ_5
A6+B1+C6 A6 = 300° B1 = 0° C6 = face 6	A5+B1+C6 A5 = 240° B1 = 60° C6 = face 6	A4+B1+C6 A4 = 180° B1 = 120° C6 = face 6	A3+B1+C6 A3 = 120° B1 = 180° C6 = face 6	A2+B1+C6 A2 = 60° B1 = 240° C6 = face 6	A1+B1+C6 A1 = 0° B1 = 300° C6 = face 6	ψ_6

Legenda da Tabela 4.2:

- A_{ij} – Posições da Mesa Indexada;
- B_{ij} – Posições da Mesa Rotativa;
- C_{ij} – Número da Face do Polígono Padrão.

Tratamento estatístico:

- Linhas – Permite obter os Desvios Angulares existentes entre as Faces do Polígono;
- Colunas – Permite obter os Erros da Mesa Rotativa;
- Diagonais – Permite obter os Erros da Mesa Indexada.

O erro ou desvio de posição da mesa rotativa e indexada é dado pela equação:

$$\psi_{k,k+1} = \frac{\psi_k - \bar{\psi}}{n} \quad \text{Equação 4.1}$$

Sendo n e k o número de faces do polígono.

No caso do polígono de 6 faces, o cálculo do desvio angular entre faces é dado pela equação:

$$\psi_k = \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n; \quad \text{Equação 4.2}$$

$$\psi_1 = A_{11} + A_{22} + A_{33} + A_{44} + A_{55} + A_{66} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$\psi_2 = A_{16} + A_{21} + A_{32} + A_{43} + A_{54} + A_{65} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$\psi_3 = A_{15} + A_{26} + A_{31} + A_{42} + A_{53} + A_{64} \quad \text{Equação 4.5}$$

$$\psi_4 = A_{14} + A_{25} + A_{36} + A_{41} + A_{52} + A_{63} \quad \text{Equação 4.6}$$

$$\psi_5 = A_{13} + A_{24} + A_{35} + A_{46} + A_{51} + A_{62} \quad \text{Equação 4.7}$$

$$\psi_6 = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{45} + A_{56} + A_{61} \quad \text{Equação 4.8}$$

$$\bar{\psi} = (\sum \psi_k) / n \quad \text{Equação 4.9}$$

Nota: É necessário ter atenção especial à convenção de sinais. O sinal dos resultados finais depende de fatores como a direção de leitura do autocolimador, o sentido da rotação de mesa e o sentido da numeração das faces do polígono. O efeito de todos estes fatores deverá ser verificado em cada calibração.

4.3.1.7 Critérios de Aceitação do Valor de Medição

De acordo com o estipulado na norma NP EN ISO/IEC 17025 que define os requisitos gerais de competência para laboratórios de calibração deverá ser estipulado um critério de aceitação dos valores de medição. Como exemplo para o caso presente propomos:

Aceitar o resultado de medição da mesa indexada/rotativa apenas se a diferença entre os valores medidos, para cada ciclo de medição for inferior ao valor da incerteza de medição de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), valor aceite ao abrigo do acordo de reconhecimento mútuo de padrões metrológicos nacionais e certificados de calibração e de medição emitidos por LNM e publicado na base de dados do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM).

Caso esta condição não se verificar repetir os ciclos de medição.

4.3.1.8 Avaliação da Incerteza de Medição da Mesa Indexada/Rotativa e Polígonos

A incerteza expandida é avaliada de acordo com “*Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, *JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)* [7] e segue o apresentado no capítulo 3 – “*Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição*”, tendo-se considerado para esta calibração as seguintes fontes de incerteza:

- a) Componente proveniente da calibração do autocolimador, $u_1(incer_AC)$

A incerteza-padrão $u_1(incer_AC)$ referente ao autocolimador, é obtida a partir do valor da incerteza de medição expandida apresentada no certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k :

$$u_1(incer_AC) = \frac{U(AC)}{k} \quad \text{Equação 4.10}$$

- b) Resolução dos dados adquiridos pelo autocolimador, $u_2(res_AC)$

O autocolimador é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_2(res_AC) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 4.11}$$

- c) Resolução dos dados adquiridos pela mesa rotativa, $u_3(res_MR)$

A mesa rotativa é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(res_MR) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 4.12}$$

- d) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_4(reprod.)$

A reprodutibilidade das medições efectuadas com o autocolimador é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_4(reprod.) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 4.13}$$

Sendo n o número de valores medidos, x_i os valores medidos individualmente observados e \bar{x} a média aritmética desses valores.

e) Erro Piramidal, $u_5(e.piram.)$

$$u_5(e.piram.) = \sqrt{\frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2} \quad \text{Equação 4.14}$$

Sendo a_+ e a_- os limites máximo e mínimo encontrados na medição do valor $(x_f - x_i)$ para os valores, correspondentes, máximos e mínimos encontrados $:(y_f - y_i)$

f) Repetibilidade da mesa rotativa, $u_6(repet_MR)$

$$u_6(repet_MR) = \sqrt{\frac{s^2(q)}{n}} \quad \text{Equação 4.15}$$

Sendo s o desvio padrão dos q valores observados na leitura do autocolimador para uma face de medição do bloco angular e n o número de aquisições ($n=200$)

A incerteza-padrão combinada do processo de calibração mesas indexadas e rotativas $u_c(y)$ é determinada pela seguinte expressão:

$$u_c(y) = \sqrt{(u_1(incer_AC))^2 + (u_2(res_AC))^2 + (u_3(res_MR))^2 + (u_4(reprod.))^2 + (u_5(e.piram.))^2 + (u_6(repet_MR))^2}$$

Equação 4.16

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(y) \quad \text{Equação 4.17}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

O número de graus de liberdade efetivos é calculado de acordo com a expressão:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

Equação 4.18

A tabela seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza:

Tabela 4.3 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza da Calibração de Mesas Indexadas/Rotativas e Polígonos

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
Xi	xi	u(xi)	ci			ui(y)
Incerteza-Padrão Autocolimador		$u_1 (incer_AC)$		Normal (Tipo B)		
Resolução Autocolimador		$u_2 (res_AC)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Mesa Rotativa		$u_3 (res_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Reprodutibilidade		$u_4 (reprod.)$		Normal (Tipo A)		
Erro Piramidal		$u_5 (e. piram.)$		Retangular (Tipo B)		
Repetibilidade Mesa Rotativa		$u_6 (repet_MR)$		Normal (Tipo A)		
					$u_c(y)$	

No anexo A e B, são apresentados os certificados de calibração, com os respectivos valores deste processo de calibração de mesas indexadas/rotativas e polígonos.

4.3.2 Calibração de Blocos Angulares Usando a Mesa Rotativa

A grandeza em avaliação é o ângulo plano e o parâmetro em avaliação é o erro de medição dado pela diferença entre o valor nominal α dos blocos angulares e o valor de referência indicado pelo autocolimador. A gama de medição é de $0^{\circ} 00' 00''$ a $90^{\circ} 00' 00''$ e $180^{\circ} 00' 00''$.

Os equipamentos necessários para esta calibração são os seguintes:

- Mesa Rotativa TEKNIKER;
- Autocolimador ELCOMAT HR;
- “AC-Finder Prism”
- Mesa Niveladora;
- Elevador e Plataformas com Ajuste Micrométrico;
- Plano Ótico;
- Nível de Bolha.

O equipamento a calibrar é o seguinte:

- Blocos Padrão Angulares

4.3.2.1 Verificações Iniciais

1. Verificar se o certificado de calibração dos padrões está em vigor;
2. Verificar pressão de ar comprimido da mesa rotativa.

4.3.2.2 Medidas de Segurança a Respeitar

1. Usar luvas;
2. Manusear com cuidados os blocos padrão.

4.3.2.3 Descrição dos Equipamentos a Utilizar

a) Colocação da mesa rotativa Tekniker em funcionamento de acordo com o descrito anteriormente no ponto 4.3.1.3.1

b) Medição com o autocolimador, ELCOMAT HR de acordo com o descrito anteriormente no ponto 4.3.1.3.2

4.3.2.4 Modo Operatório

No laboratório é preparada a montagem dos padrões de trabalho e padrões a calibrar e respectivos acessórios de acordo com o apresentado na figura seguinte:

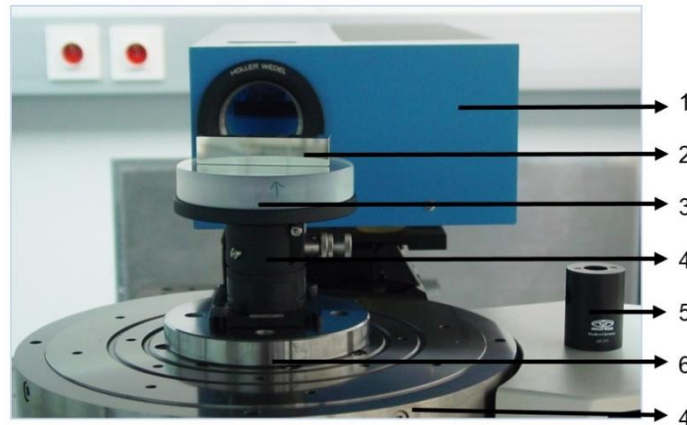


Figura 4.18 - Esquema de Montagem para a Calibração de Blocos Padrão Angulares

Legenda da montagem da Figura 4.18:

1. Autocolimador;
2. Bloco padrão angular;
3. Plano ótico;
4. Mesa Niveladora;
5. “AC-Finder Prism”;
6. Base de Fixação;
7. Mesa Rotativa.

Sequência a realizar para a montagem:

1. Colocar o autocolimador sobre dois elevadores de posicionamento;
2. Sobre a mesa rotativa colocar o sistema de fixação;
3. Fixar a mesa niveladora ao sistema de fixação;
4. Nivelar a mesa niveladora com nível de bolha;
5. Colocar sobre a mesa niveladora o plano ótico;
6. Colocar bloco angular sobre o plano ótico, de modo a que se face de medição inicial se encontre perpendicular ao eixo de medição do autocolimador (Figura 4.18).

Nota: Depois da receção dos blocos angulares pelo laboratório deverá proceder-se à sua limpeza com, por exemplo: petróleo branco. Após limpeza estes devem permanecer no laboratório a estabilizar por um período de, no mínimo, 90 minutos.

4.3.2.5 Minimização do Erro Piramidal

O erro piramidal é o valor da diferença da indicação em X no autocolimador entre a face 2 do bloco angular e a indicação da face 1. A minimização do erro piramidal é obtida quando o valor da diferença da indicação em Y no autocolimador entre a face 2 do bloco angular e a indicação da face 1 é zero.

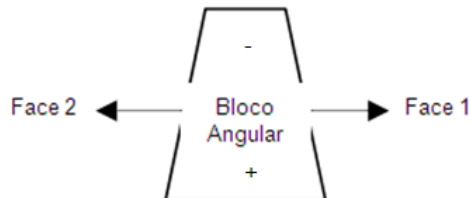


Figura 4.19 - Esquema para Identificação das Faces de Medição do Bloco Angular

Após o alinhamento inicial do bloco angular relativamente ao autocolimador, deverá proceder-se à minimização do erro piramidal, para isso colocar a indicação do eixo X do autocolimador próximo de zero, utilizando os micrómetros de posicionamento dos sistemas (elevadores) de suporte do autocolimador.

Colocar a indicação do eixo Y do autocolimador próximo de zero deslocando verticalmente a parte de trás do autocolimador, através dos seus micrómetros de posicionamento.

Efetuar o comando de rotação da mesa rotativa, através da unidade de controlo, de modo a que a face 2, (Figura 4.19), do bloco angular se encontre perpendicular ao feixe ótico do autocolimador e verificar se Y está próximo de zero. Caso não esteja, utilizar os micrómetros da mesa niveladora, para aproximar a indicação do eixo Y a zero.

Para minimizar o erro piramidal a diferença entre a indicação da face 2 do bloco angular e a indicação da face 1, relativamente ao eixo Y, deverá ser o mais próxima de zero possível $[(Y_f - Y_i) \approx 0]$.

4.3.2.6 Procedimento Experimental

Para cada bloco padrão angular, deverão ser realizados, pelo menos, quatro programas de aquisição de dados com diferentes posicionamentos iniciais da mesa rotativa, cada um com ciclos de 12 medições.

Ciclo 1 (Figura 4.20)

1. Colocar a mesa rotativa no ângulo inicial estipulado;
2. Colocar o bloco padrão angular a medir sobre o plano ótico com a face 1 perpendicular ao eixo ótico do autocolimador;
3. Minimizar o erro piramidal;
4. Registrar o valor do autocolimador, ($X_{inicial}$);
5. Rodar a mesa rotativa de um ângulo de $[(\text{ângulo inicial} + 180^\circ) - \alpha]$, de modo a que a face 2 do bloco esteja agora perpendicular ao eixo ótico do autocolimador (X_{final});
6. Registrar valor final, (X_{final});
7. Calcular o valor medido, através da equação:

$$VM (\text{Ciclo1}) = \alpha + (X_{final} - X_{inicial}) \quad \text{Equação 4.19}$$

8. Repetir esta sequência 12 vezes.

Ciclo 2

1. Posicionar a mesa rotativa no ângulo inicial estipulado;
2. Colocar o bloco padrão angular a medir sobre o plano ótico com a face 2 perpendicular ao eixo ótico do autocolimador;
3. Minimizar o erro piramidal;
4. Registrar valor x do autocolimador, ($X_{inicial}$);
5. Rodar a mesa rotativa de um ângulo de $[(\text{ângulo inicial} + 180^\circ) + \alpha]$, de modo a que a face 1 do bloco esteja agora perpendicular ao eixo ótico do autocolimador (X_{final});
6. Registrar valor final, (X_{final});
7. Calcular valor medido através da equação:

$$VM (\text{Ciclo2}) = \alpha + (X_{final} - X_{inicial}) \quad \text{Equação 4.20}$$

8. Repetir esta sequência 12 vezes.

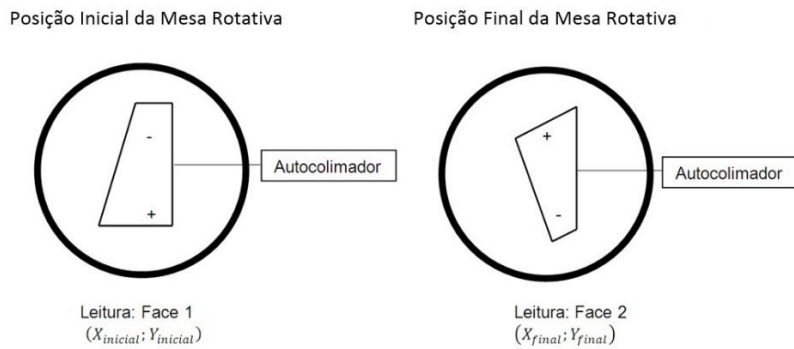


Figura 4.20 - Exemplo de Posicionamento Bloco Angular e da Mesa Rotativa

Repetir estes dois ciclos de medição para uma nova posição inicial da mesa rotativa.

O valor da medição para o bloco angular, a apresentar no Certificado de calibração, é obtido através da média dos valores medidos, VM (Ciclo1) e VM (Ciclo2).

4.3.2.7 Critérios de Aceitação do Valor Medido

Aceitar apenas o valor de medição do bloco padrão angular se a diferença entre os valores medidos, nos dois ciclos for inferior ao valor da incerteza de medição de acordo com o valor da incerteza de calibração definido na CMC para a calibração de blocos angulares.

Caso contrário repetir os ciclos de medição.

4.3.2.8 Avaliação da Incerteza de Medição de Calibração de Blocos Angulares

A incerteza expandida é avaliada de acordo com “Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) [7] e segue o apresentado no Capítulo 3 – “Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição”. Foram consideradas as seguintes fontes de incerteza:

- a) Componente proveniente da calibração do autocolimador, $u_1(incer_AC)$

A incerteza-padrão $u_1(incer_AC)$ referente ao autocolimador, é obtida a partir do valor da incerteza de medição expandida apresentada no Certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k :

$$u_1(incer_AC) = \frac{U(AC)}{k} \quad \text{Equação 4.21}$$

b) Resolução dos dados adquiridos pelo autocolimador, $u_2(res_AC)$

O autocolimador é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_2(res_AC) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 4.22}$$

c) Componente proveniente da calibração da mesa rotativa, $u_3(incer_MR)$

A incerteza-padrão $u_3(incer_MR)$, referente à mesa rotativa, é apresentada no certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k

$$u_3(incer_MR) = \frac{U(MR)}{k} \quad \text{Equação 4.23}$$

d) Resolução dos dados adquiridos pela mesa rotativa, $u_4(res_MR)$

A mesa rotativa é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_4(res_MR) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 4.24}$$

e) Reprodutibilidade das medições efectuadas, $u_5(reprod.)$

A reprodutibilidade das medições efectuadas com o autocolimador é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_5(reprod.) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 4.25}$$

Sendo n o número de valores medidos, x_i os valores medidos individualmente observados e \bar{x} a média aritmética desses valores.

f) Erro piramidal, $u_6(e.piram.)$

$$u_6(e.piram.) = \sqrt{\frac{1}{12} (a_+ - a_-)^2} \quad \text{Equação 4.26}$$

Sendo a_+ e a_- os limites máximo e mínimo encontrados na medição do valor $(x_f - x_i)$ para os valores, correspondentes, máximos e mínimos encontrados $:(y_f - y_i)$

g) Repetibilidade da mesa rotativa, $u_7(repet_MR)$

$$u_7(repet_MR) = \sqrt{\frac{s^2(q)}{n}} \quad \text{Equação 4.27}$$

Sendo s o desvio padrão dos q valores observados na leitura do autocolimador para uma face de medição do bloco angular e n o número de aquisições ($n=200$)

A incerteza-padrão combinada do processo de calibração de blocos angulares $u_c(y)$ é determinada pela seguinte expressão:

$$u_c(y) = \sqrt{(u_1(incer_AC))^2 + (u_2(res_AC))^2 + (u_3(incer_MR))^2 + (u_4(res_MR))^2 + (u_5(reprod.))^2 + (u_6(e.piram.))^2 + (u_7(repet_MR))^2}$$

Equação 4.28

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(y) \quad \text{Equação 4.29}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efetivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{V_i}} \quad \text{Equação 4.30}$$

A Tabela 4.4 seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza do processo de calibração de blocos padrão angulares.

Tabela 4.4 - Componentes do Balanço de Incerteza da Calibração dos Blocos Padrão Angulares

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i			$u_i(y)$
Incerteza-Padrão Autocolimador		$u_1 (incer_AC)$		Normal (Tipo B)		
Resolução Autocolimador		$u_2 (res_AC)$		Retangular (Tipo B)		
Incerteza-Padrão Mesa Rotativa		$u_3 (incer_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Mesa Rotativa		$u_4 (res_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Reprodutibilidade		$u_5 (reprod.)$		Normal (Tipo A)		
Erro Piramidal		$u_6 (e. piram.)$		Retangular (Tipo B)		
Repetibilidade Mesa Rotativa		$u_7 (repet_MR)$		Normal (Tipo A)		
						$u_c(y)$

No anexo C1 é apresentado um exemplo dos valores obtidos das medições realizadas a um bloco angular e o respetivo certificado de calibração de um conjunto de blocos angulares no anexo C2.

4.3.3 Calibração de Óticas Angulares

No processo de calibração de óticas angulares o parâmetro em avaliação é a distância entre os dois cubos retrorefletores do refletor angular, E (Figura 4.21) e a gama de medição, expressa em milímetros, varia de padrão para padrão.

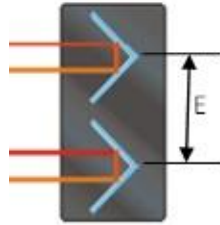


Figura 4.21 - Esquema do Refletor Angular e Mensuranda em Avaliação

Os equipamentos necessários para esta calibração são os seguintes:

- Mesa Rotativa;
- Sistema Interferométrico Laser;
- Mesa Niveladora;
- Base de Fixação;
- Haste com Plataforma de Altura Ajustável;
- Paquímetro;
- Nível de Bolha.

4.3.3.1 Verificações Iniciais

1. Verificar se o certificado de calibração dos padrões está em vigor;
2. Verificar a pressão do ar comprimido da rotativa;
3. Verificar se o Interferómetro Laser se encontra devidamente nivelado;

4.3.3.2 Medidas de Segurança a Respeitar

1. Usar luvas;
2. Não olhar diretamente para o laser;
3. Não entrar em contacto com a mesa rotativa quando em movimento.

4.3.3.3 Descrição dos Equipamentos a Utilizar

- a) Colocação da mesa rotativa Tekniker em funcionamento de acordo com o descrito no ponto

4.3.1.3.1

4.3.3.4 Modo Operatório

No laboratório é preparada a montagem dos padrões de trabalho e padrões a calibrar e respetivos acessórios de acordo com o apresentado na figura seguinte:



Figura 4.22 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração das Óticas Angulares dos Sistemas Interferométricos

Legenda da Figura 4.22:

1. Interferómetro Laser *HP*;
 2. Interferómetro Angular;
 3. Refletor Angular;
 4. Torre de Controlo do Sistema Interferométrico Laser;
 5. Mesa Rotativa *TEKNIKER*;
 6. Mesa Niveladora;
 - a) Plataforma de Altura Ajustável;
 - b) Haste;
 - c) Base de Fixação.
-
1. Ligar interferómetro laser e esperar 600 s para estabilizar;
 2. Ligar mesa rotativa
 3. Acoplar a base de fixação à mesa niveladora;
 4. Colocar a mesa niveladora sobre a mesa rotativa;
 5. Aparafusar a haste perto da mesa rotativa;
 6. Colocar à mesma altura a plataforma de altura ajustável com a base de fixação;
 7. Colocar interferómetro angular sobre a plataforma;
 8. Colocar refletor angular sobre a base de fixação;

9. Alinhar, com a ajuda do paquímetro, o interferómetro angular com o refletor angular de modo a que as suas faces fiquem paralelas como demonstrado na Figura 4.23.
10. Alinhar o interferómetro laser com o interferómetro angular e refletor angular

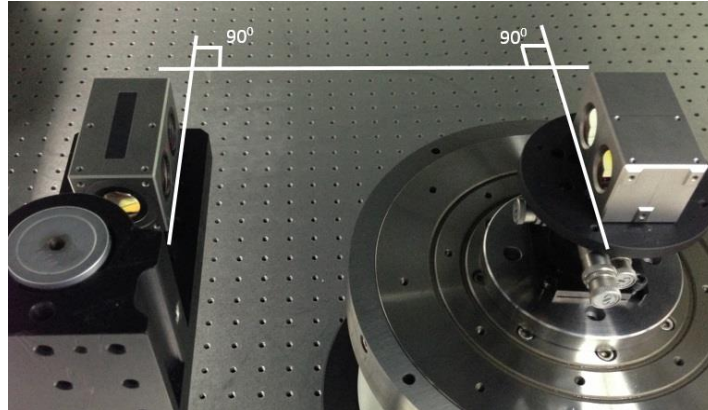


Figura 4.23 - Alinhamento das Faces do Interferómetro Angular e Refletor Angular

4.3.3.5 Procedimento Experimental

Ligar o laser interferométrico e proceder aos seguintes ajustes:

1. Pressionar o botão “*Distance*” na torre de controlo para medir distâncias;
2. Pressionar o botão “*Resol*” seguido do botão “5” para leituras de resolução com 5 casa decimais;
3. Pressionar o botão “*Auto Record*” para registar os dados no computador;
4. Executar o programa “*INDEXTABLE.exe*” da mesa rotativa;
5. No programa, posicionar a mesa rotativa em 0° ;
6. Pressionar o botão “*Reset*” na torre de controlo;
7. Gerar sequencialmente na mesa rotativa, oito valores de ângulos ($\pm 8^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 12^\circ$, $\pm 15^\circ$), através do programa “*INDEXTABLE.exe*” de controlo da mesma;
8. Registrar os valores indicados no interferómetro laser;

O registo dos valores indicados no interferómetro laser podem ser obtidos a partir do programa “*Mesa indexada.vi*” em *Labview* disponibilizado pelo computador do L2 seguindo os seguintes passos:

9. Arrancar o programa “*Mesa indexada.vi*” em *Labview* que abrirá a janela como demonstrado na seguinte Figura 4.24;

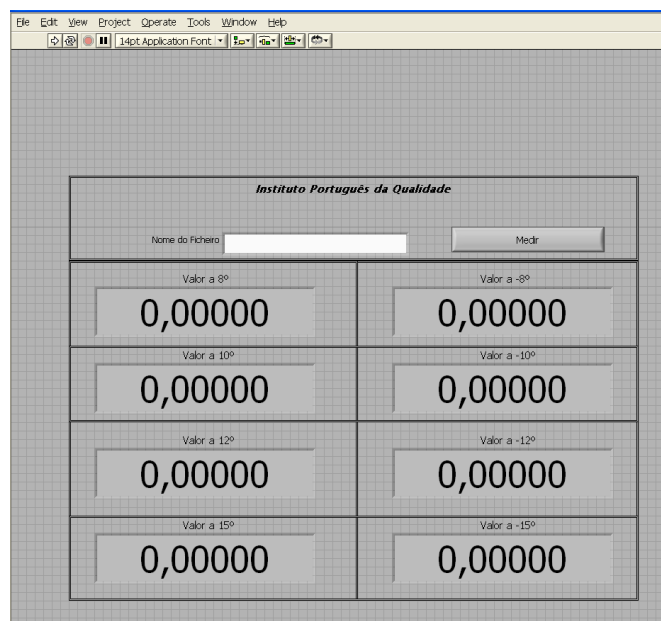


Figura 4.24 - Janela do Programa: Mesa indexada.vi

10. Introduzir o nome do ficheiro (onde será arquivado os resultados da indicação do laser interferómetro);
11. Seguir as indicações do programa posicionando sequencialmente a mesa rotativa em 0° e nos valores de ângulo indicados pelo programa.

Todos os resultados serão registados na folha de cálculo.

4.3.3.6 Critérios de Aceitação

Para otimizar o alinhamento entre os sistemas Interferómetro laser e óticas angulares, gerar com a mesa indexada os ângulos $+15^\circ$ e -15° , e registar os respetivos valores de indicação fornecidos pelo Interferómetro laser. Deverão ser efetuados os ajustes de posicionamento necessários até se obter uma diferença em módulo entre esses dois valores, inferior a $1 \mu\text{m}$. Quando essa diferença tiver sido alcançada, poderá então iniciar-se o processo de medição do valor do “entre-eixo”, E , característico do refletor angular.

4.3.3.7 Determinação de E

O valor do “entre eixo”, E , é determinado através da média de valores obtidos para os oito ângulos gerados e usando a seguinte expressão:

$$2E = \frac{V(\beta)}{\sin(\beta)} + \frac{V(-\beta)}{\sin(-\beta)} \quad \text{Equação 4.31}$$

$2E$ representa a diferença do trajeto ótico entre os dois feixes refletidos pelo refletor angular (em mm), V o valor indicado no interferómetro laser para o ângulo correspondente da mesa indexada, β .

Repetir os passos anteriores para $n=3$ (onde n representa a determinação de E com os oito ângulos gerados).

O valor final resulta da média dos valores de E determinados.

4.3.3.8 Avaliação da Incerteza de Medição

Foram consideradas as seguintes componentes para a avaliação do balanço de incerteza:

- a) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_1(reprodu_E)$, é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_1(reprodu_E) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 4.32}$$

Sendo n o número de valores medidos, E_i os valores medidos individualmente observados e \bar{E} a média aritmética desses valores.

- b) Repetibilidade da mesa rotativa, $u_2(repet_MR)$

$$u_2(repet_MR) = \sqrt{\frac{s^2(q)}{n}} \quad \text{Equação 4.33}$$

Sendo s o desvio padrão dos q valores observados (valor obtido a partir do desvio padrão dos q valores de posicionamento da mesa rotativa quando a calibrar autocolimadores).

- c) Componente proveniente da calibração da mesa rotativa, $u_3(incer_MR)$

A incerteza-padrão $u_3(incer_MR)$, referente à mesa rotativa, é apresentada no certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k :

$$u_3(incer_MR) = \frac{U(MR)}{k} \quad \text{Equação 4.34}$$

- d) Resolução dos dados adquiridos pela mesa rotativa, $u_4(res_MR)$

A mesa rotativa é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_4(res_MIR) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 4.35}$$

e) Componente proveniente da do padrão interferómetro *HP*, $u_5(incer_HP)$

A incerteza-padrão $u_5(incer_HP)$, referente ao interferómetro *HP*, é o resultado da variância das componentes resultantes do Certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k , da repetibilidade para $n=1000$ aquisições de indicação de distância, da resolução e da incerteza da equação d'Edlen.

A incerteza-padrão combinada associada à grandeza E é dada por:

$$u_c(y) = \sqrt{(u_1(reprodu_E))^2 + (u_2(repet_MR))^2 + (u_3(incer_MR))^2 + (u_4(res_MR))^2 + (u_5(incer_HP))^2}$$

Equação 4.36

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(y) \quad \text{Equação 4.37}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efetivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{V_i}} \quad \text{Equação 4.38}$$

A Tabela 4.5 seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza do processo de calibração de óticas angulares:

Tabela 4.5 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Óticas Angulares

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i			$u_i(y)$
Reprodutibilidade de E		$u_1 (reproduz_E)$		Normal (Tipo B)		
Reprodutibilidade Mesa Rotativa		$u_2 (repet_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Incerteza Expandida da Mesa Rotativa		$u_3 (incer_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Mesa Rotativa		$u_4 (res_MR)$		Retangular (Tipo B)		
Incerteza HP		$u_5 (reprod.)$		Normal (Tipo A)		
						$u_c(y)$

No anexo D são apresentados os resultados de medição correspondentes à calibração realizada de óticas angulares.

4.3.4 Processo a Implementar: Calibração de Sutas

A suta (Figura 4.25) é um instrumento que nos permite medir, verificar por comparação ou transferir ângulos, ou seja, permite-nos conhecer o estado de determinada grandeza de uma peça, comparando-a com um padrão de valor conhecido [11].

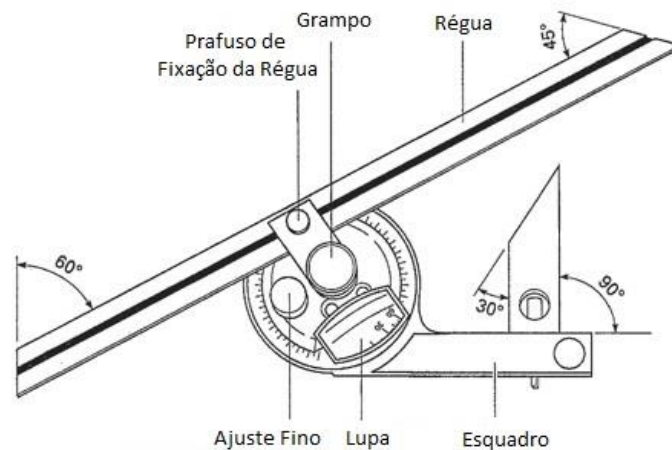


Figura 4.25 - Esquema da Suta

No processo de calibração a grandeza em avaliação é o ângulo plano e o parâmetro em avaliação é o erro de medição dado pela diferença entre o valor nominal α dos blocos angulares e o valor indicado na suta. A gama de medição é de $00^{\circ}00'$ a $90^{\circ}00'$ a $00^{\circ}00'$.

Os equipamentos necessários para esta calibração são os seguintes:

- Blocos Padrão Angulares;
- Plano Ótico e/ou Mesa de Granito

O equipamento a calibrar é o seguinte:

- Suta

4.3.4.1 Verificações Iniciais

1. Verificar se a suta está em bom estado de funcionamento;
2. Verificar se o certificado de calibração dos padrões está em vigor;
3. Verificar se a superfície da mesa de granito se encontra limpa e em bom estado.

4.3.4.2 Medidas de Segurança a Respeitar

1. Usar luvas;
2. Manusear com cuidado, os blocos padrão.

4.3.4.3 Modo Operatório

Para os quatro quadrantes da suta propõe-se os valores nominais α a medir seguintes (Tabela 4.6):

Tabela 4.6 - Valor Nominal α

Quadrante	Valor Nominal α		
1 °	30° 10'	45° 00'	90° 00'
2 °	30° 00'	30° 10'	45° 00'
3 °	30° 00'	41° 00'	-----
4 °	15° 00'	45° 00'	-----

A realização dos valores nominais α iguais a 30° 10' ou 15° 00', nem sempre é simples, pois os conjuntos blocos padrão nem sempre têm estes valores. Para se obter esse valor nominal α , tem que se aderir as faces de superfície de dois ou mais blocos padrão. A Tabela 4.7 apresenta que blocos a aderir para se obter o valor nominal α pretendido, quando utilizado os padrões de ângulo existentes no IPQ.

Tabela 4.7 - Blocos Padrão a Utilizar para Formar Valor Nominal α pretendido

Valor Nominal α	Blocos Padrão utilizados
15° 00'	9° + 6°
30° 00'	27° + 3°
30° 10'	27° + 3° + 9' + 1'
41° 00'	41°
45° 00'	41° + 3° + 1°
90° 00'	90°

4.3.4.4 Procedimento Experimental

Para o 1º quadrante da suta (Figura 4.26), realizar os seguintes passos:

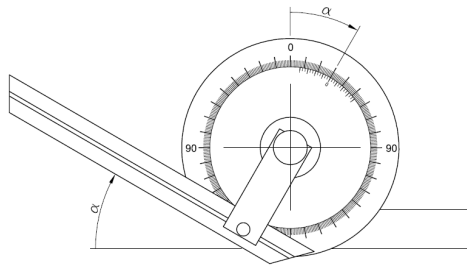


Figura 4.26 - 1º Quadrante

1. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $30^{\circ} 10'$;
2. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
3. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
4. Registrar o valor indicado na suta;
5. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $45^{\circ} 00'$;
6. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
7. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α (Figura 4.27);
8. Registrar o valor indicado na suta;
9. Limpar o bloco $90^{\circ} 00'$;
10. Sobre a mesa de granito, medir o ângulo do bloco padrão com a suta;
11. Registrar o valor indicado na suta;

Nota: Para se medir certos valores nominais α com a suta, é necessário a utilização do plano ótico. Segue-se a Figura 4.27 seguinte a exemplificar como medir valor nominal α igual 45° .

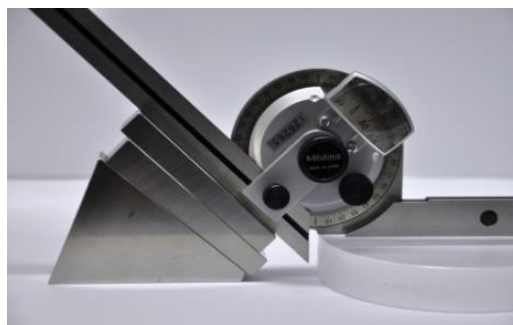


Figura 4.27 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45° para o 1º Quadrante da Suta

Para o 2º Quadrante da suta (Figura 4.28), realizar os seguintes passos:

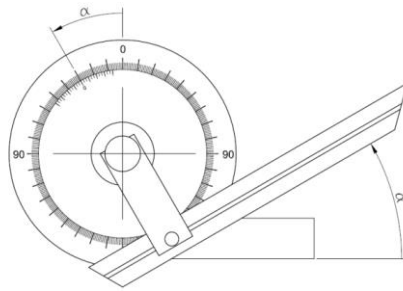


Figura 4.28 - 2º Quadrante

1. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $30^{\circ} 00'$;
2. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
3. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
4. Registrar o valor indicado na suta;
5. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $30^{\circ} 10'$;
6. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
7. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
8. Registrar o valor indicado na suta;
9. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $45^{\circ} 00'$;
10. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
11. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α (Figura 4.29);
12. Registrar o valor indicado na suta;

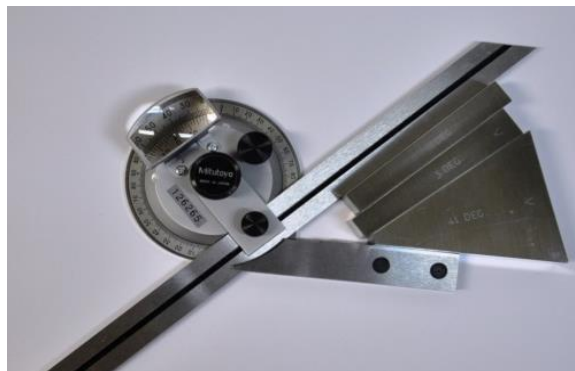


Figura 4.29 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45° para o 2º Quadrante da Suta

Para o 3º quadrante da suta (Figura 4.30), realizar os seguintes passos:

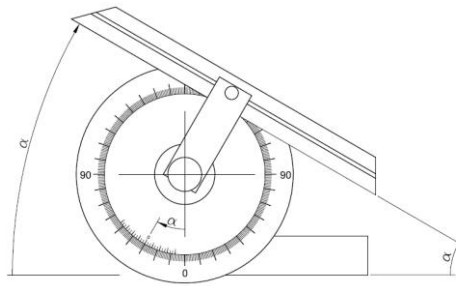


Figura 4.30 - 3º Quadrante

1. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $30^\circ 00'$;
2. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
3. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
4. Registrar o valor indicado na suta;
5. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a $41^\circ 00'$;
6. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
7. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
8. Registrar o valor indicado na suta;

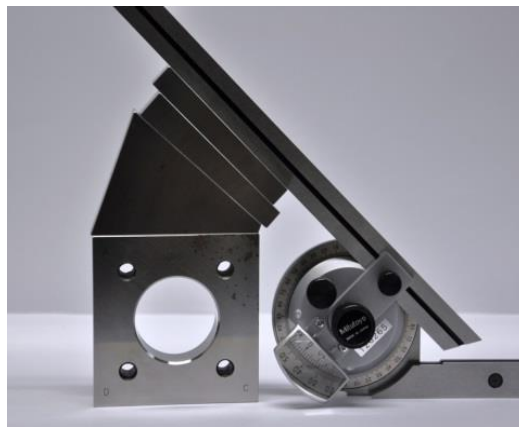


Figura 4.31 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45° para o 3º Quadrante da Suta

Para o 4º Quadrante da suta (Figura 4.32), realizar os seguintes passos:

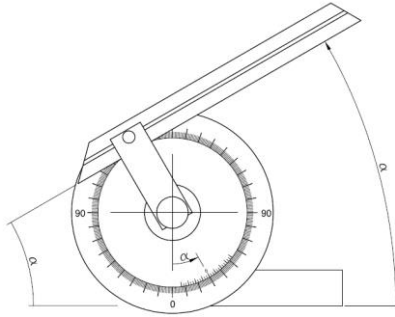


Figura 4.32 - 4º Quadrante

1. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a 15° 00';
2. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
3. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
4. Registrar o valor indicado na suta;
5. Limpar os blocos padrão necessários para formar o valor nominal α igual a 45° 00';
6. Aderir as faces de superfície dos blocos padrão;
7. Sobre a mesa de granito, medir com a suta o valor nominal α ;
8. Registrar o valor indicado na suta.

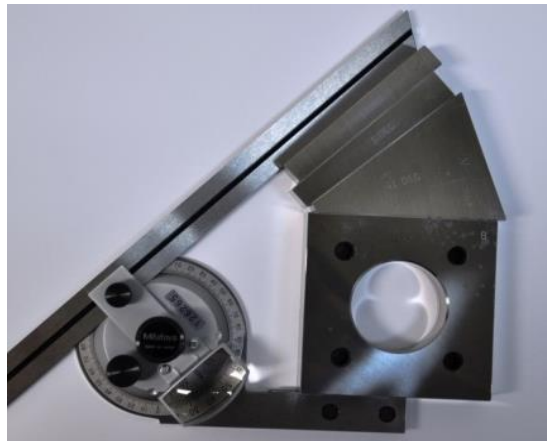


Figura 4.33 - Esquema de Como Medir Valor Nominal igual a 45° para o 4º Quadrante da Suta

Nota: O número de medições independentes a efetuar é de 5 para cada valor de referência a calibrar. Os resultados de medição a apresentar, para a mensuranda em avaliação, é a média dos resultados obtidos nas 5 medições independentes.

4.3.4.5 Critérios de Aceitação do Valor de Medição

Rejeitar valor se o erro de medição for superior a duas vezes a resolução da suta.

4.3.4.6 Avaliação da Incerteza de Medição

A incerteza expandida é avaliada de acordo com “*Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) [7] e segue o apresentado no Capítulo 3 – “*Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição*”. As componentes de incerteza a considerar são as seguintes:

- a) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_1(reprodu)$ é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_1(reprodu) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 4.39}$$

Sendo n o número de valores medidos, α_i os valores medidos individualmente observados e $\bar{\alpha}$ a média aritmética desses valores.

- b) Incerteza dos blocos padrão angulares, $u_2(incer_blocos)$

$$u_2(incer_blocos) = \frac{U}{k} \quad \text{Equação 4.40}$$

- c) Resolução da suta, $u_3(res_suta)$

A suta é um equipamento com resolução de 5', pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(res_suta) = \sqrt{\frac{1}{3} \times 5^2} \quad \text{Equação 4.41}$$

A incerteza-padrão combinada associada à grandeza α é dada por:

$$u_c(y) = \sqrt{(u_1(reprodu))^2 + (u_2(incer_blocos))^2 + (u_3(res_suta))^2}$$

Equação 4.42

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad \text{Equação 4.43}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efetivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{V_i}} \quad \text{Equação 4.44}$$

A Tabela 4.8 seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza do processo de calibração de sutas.

Tabela 4.8 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Sutas

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i			$u_i(y)$
Reprodutibilidade		$u1 (reprodu)$		Normal (Tipo A)		
Incerteza Blocos Padrão		$u2 (incer_blocos)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução da Suta		$u3 (res_suta)$		Retangular (Tipo B)		
					$u_c(y)$	

No anexo E1 é apresentado o procedimento experimental implementado para este processo de calibração, e no anexo E2, é apresentado o respetivo certificado de calibração

5 Calibração de Autocolimadores

O presente capítulo visa apresentar os estudos e análise dos valores e resultados obtidos no processo de medição e consequente calibração do autocolimador, quando variamos o comprimento percorrido pelo feixe e a abertura do feixe.

Os trabalhos desenvolvidos nos capítulos anteriores, nos quais o autocolimador foi utilizado como padrão de referência de algumas das calibrações referidas, por exemplo na calibração de blocos angulares, constituíram um ponto de partida para o conhecimento das especificações metrológicas e modo de funcionamento do autocolimador.

O desenvolvimento seguinte passou pelo estudo do processo de calibração de autocolimadores implementado e a atualização do mesmo, tendo em conta o programa de execução da comparação internacional de autocolimadores², na qual o IPQ se encontra envolvido [19].

Os autocolimadores são dispositivos óticos para a medição exata e sem contato de ângulos gerados por uma superfície refletora. São utilizados numa ampla gama de aplicações em metrologia por exemplo, no ajuste de ângulos, na medição de linearidades e planicidades, etc.. O autocolimador utilizado para este estudo foi o autocolimador ELCOMAT HR, descrito no Capítulo 4 – “*Calibração de Equipamentos de Medição do Ângulo*” no ponto 4.2.1.1., com as seguintes especificações metrológicas:

- Amplitude de Medição: $\pm 150''$;
- Resolução: $0,01''$.

5.1 Método de Medição e Procedimento Experimental

A primeira experiência consistiu em efetuar medições e aquisições de dados para uma distância fixa de 300 mm entre o autocolimador e o espelho refletor.

O equipamento necessário para esta medição foi o seguinte:

- Mesa Rotativa;
- Espelho Refletor;
- Mesa Niveladora;
- Base de Fixação;
- Diafragma.

² Technical Protocol EURAMET.L-K3a.2009 *Angle Comparison Using an Autocollimator* (Project # 1074)

Na Figura 5.1 é apresentada uma foto da montagem a realizar para obtenção dos dados.

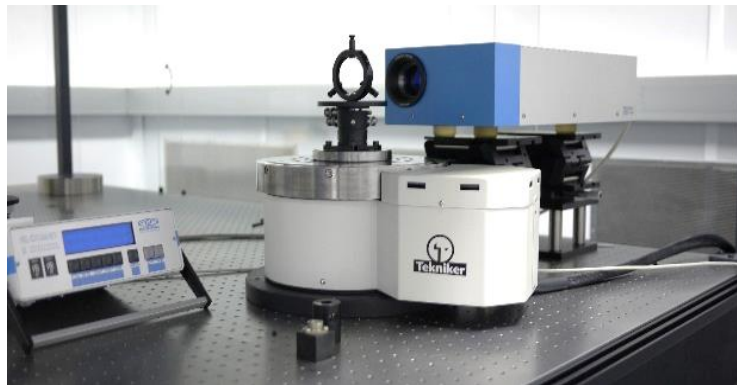


Figura 5.1 - Esquema para a Calibração de Autocolimadores

A calibração do autocolimador segundo o eixo horizontal de medição, eixo X, é efetuada usando como padrão de referência a mesa rotativa. Sobre a mesa rotativa, é colocado uma base de modo a fixar a mesa niveladora. Sobre a mesa niveladora é colocado o espelho refletor com elevada refletividade ($\approx 100\%$), à distância de 300 mm do autocolimador. Tanto o espelho como a mesa niveladora, devem estar concêntricos com a mesa rotativa. Deverá proceder-se ao alinhamento do espelho refletor de modo a minimizar o erro piramidal (orientar a mesa niveladora em Y).

Para esta experiência utilizou-se a abertura total do autocolimador sendo este de aproximadamente 30 mm de diâmetro, pelo que não foi utilizado o diafragma.

Realizados estes passos, é iniciado o processo de aquisição dos valores que permitirão a obtenção do erro de medição do autocolimador segundo o eixo X.

Através das aplicações informáticas de controlo e aquisição de dados da mesa rotativa e do autocolimador (desenvolvidas com o software *LabView*) existentes no IPQ, é realizado o seguinte processo experimental.

Para as medições do eixo X, são efetuados ciclos de medição com gamas de medição abrangendo a especificação do autocolimador e com degraus de 1 arco-segundo, gerados pela mesa rotativa:

- Medição: ± 150 arco-segundo com passo de 1 arco-segundo.

No processo de calibração do autocolimador pretende-se obter o erro de medição, δ , dado pela diferença entre o angulo medido pelo autocolimador e o angulo gerado pela mesa rotativa respetivo, de acordo com a seguinte equação:

$$\delta = \alpha_{AC} - \alpha_{REF} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

δ : Desvio Angular do Autocolimador;

α_{AC} : Ângulo Medido pelo Autocolimador;

α_{REF} : Ângulo Medido pelo Sistema de Referência.

O número de medições angulares para cada α_{AC} e α_{REF} foi de respectivamente $n_{AC} = 20$ e $n_{REF} = 20$. Os valores médios e os desvios padrão são calculados para análises posteriores, e incluem a média das medições angulares do autocolimador e a média do desvio angular do autocolimador.

Para a avaliação final do erro de medição a apresentar foram realizados 8 ciclos (“Up” “Down”) com 16 medições individuais, $n_r = 8 \times 2 = 16$, para três posições angulares iniciais diferentes entre o autocolimador e a mesa rotativa, incluindo inversão da direção do padrão de rotação para cada posição, para eliminar desvios lineares da média. Em seguida é calculada a média das 16 medições, para obtenção o valor final do resultado da calibração.

5.2 Valores Obtidos

Um dos valores obtidos num ciclo de medição, na sequência da aplicação do procedimento definido acima é apresentado no anexo F1 como exemplo.

Os valores a obter, apresentados nesse exemplo, são os descritos na Tabela 5.1 representando o seguinte:

Tabela 5.1 - Legenda dos Valores Medidos

V Nominal α	Down						Up						Média δ
	Mesa Rotativa			Autocolimador			Mesa Rotativa			Autocolimador			
	Média α_{REF}	Desvio Padrão	n_{REF}	Média α_{AC}	Desvio Padrão	n_{AC}	δ	Média α_{REF}	Desvio Padrão	n_{REF}	Média α_{REF}	Desvio Padrão	

Onde:

- Valor Nominal α – Ângulo α a medir;
- Down – Ciclo com Direção de Medição de 150° a -150°;
- Up – Ciclo com Direção de Medição de -150° a 150°;
- Média α_{REF} – Média dos Valores Medidos pelo Padrão de Referência;
- n_{REF} – Número de Aquisições para cada α do Padrão de Referência;
- Média α_{AC} – Média dos Valores Medidos pelo Autocolimador;

- n_{AC} – Número de Aquisições para cada α do Autocolimador;
- δ – Desvio Angular do Autocolimador em relação ao Padrão de Referência, ou Erro de Medição;
- Média δ – Média do Desvio Angular dos dois ciclos do Autocolimador em relação ao Padrão de Referência, para cada Valor Nominal α gerado.

Dado o número significativo de valores obtidos optou-se por apresentar seguidamente os gráficos em vez da listagem de todos os valores obtidos nas 8 medições realizadas:

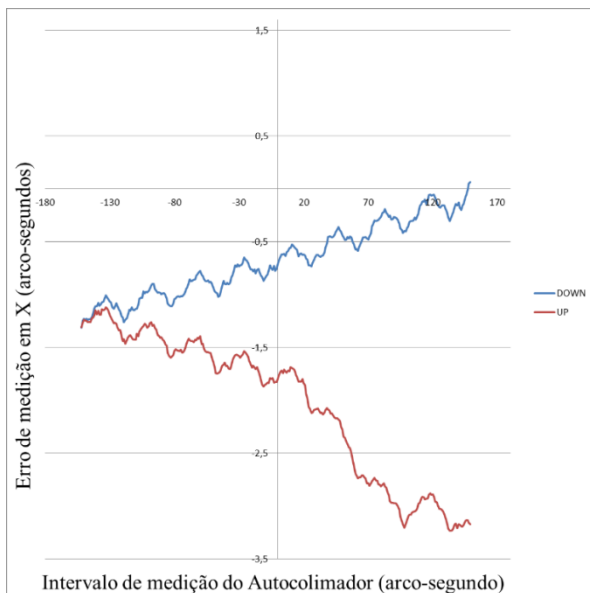


Figura 5.2 - Erro de Medição em X da Medição nº1 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

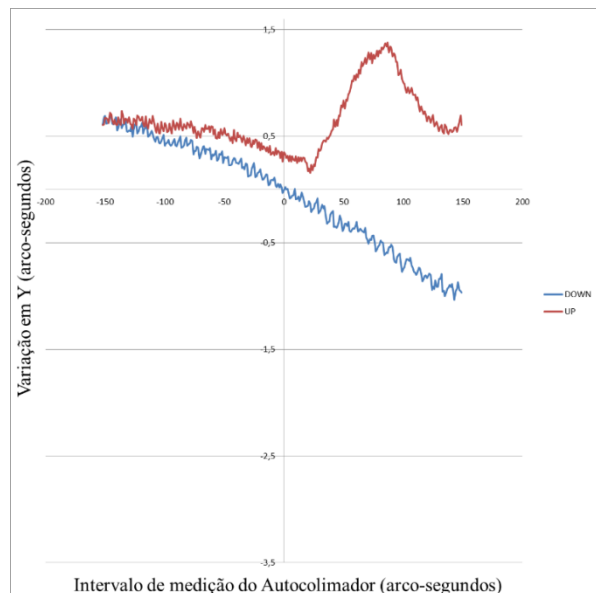


Figura 5.3 - Variação em Y da Medição nº1 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

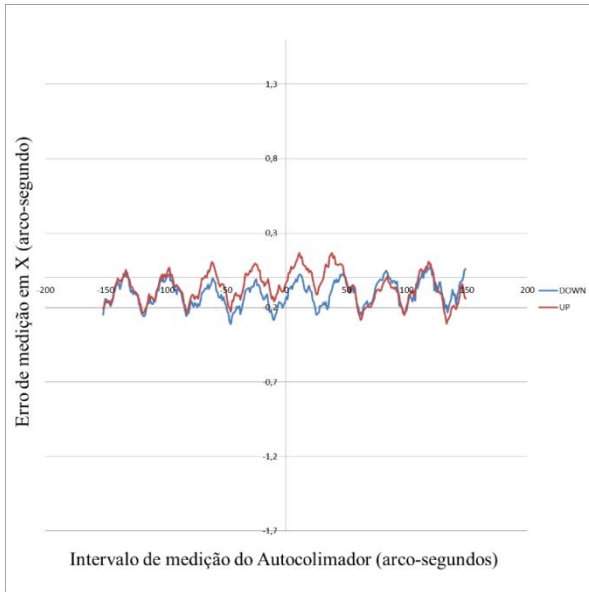


Figura 5.4 - Erro de Medição em X da Medição nº2 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

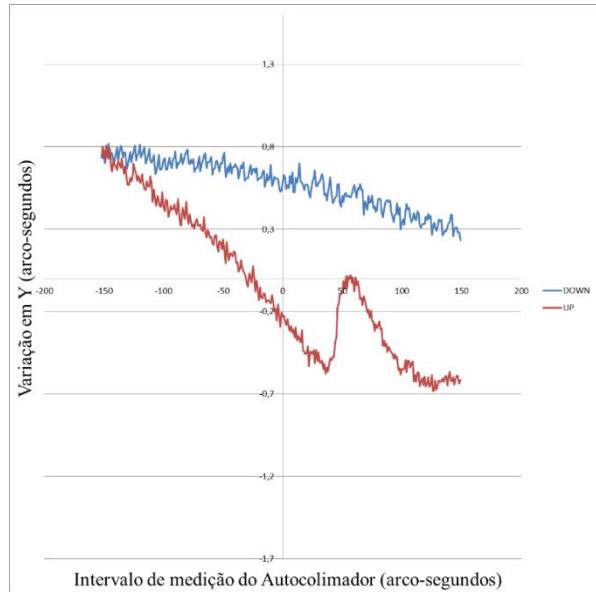


Figura 5.5 - Variação em Y da Medição nº2 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

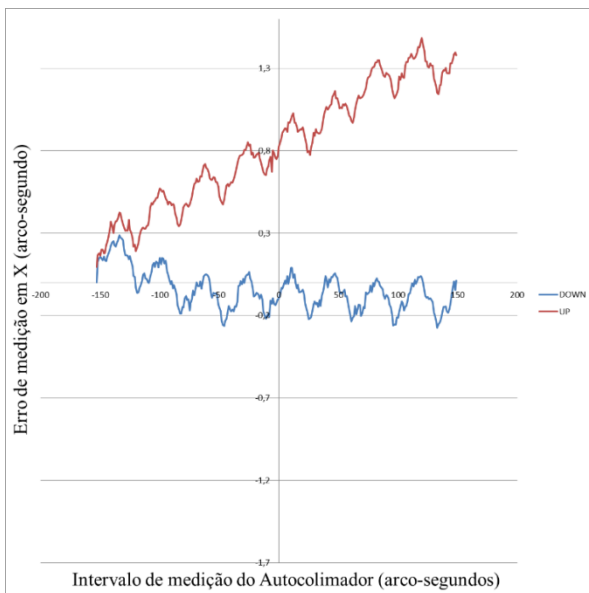


Figura 5.6 - Erro de Medição em X da Medição nº3 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

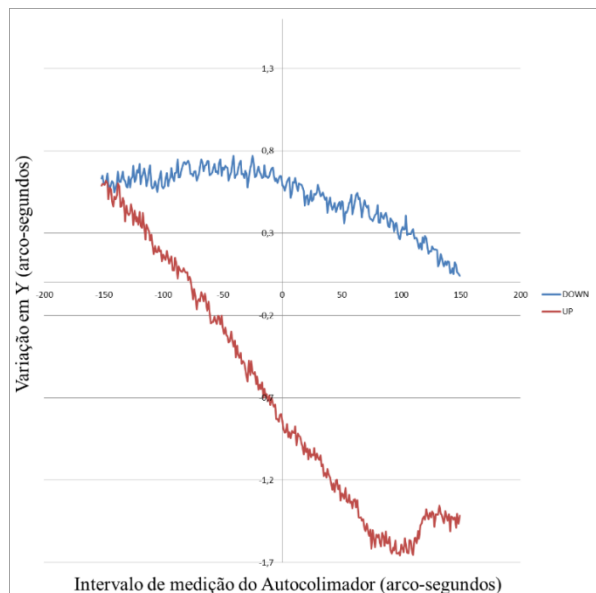


Figura 5.7 - Variação em Y da Medição nº3 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

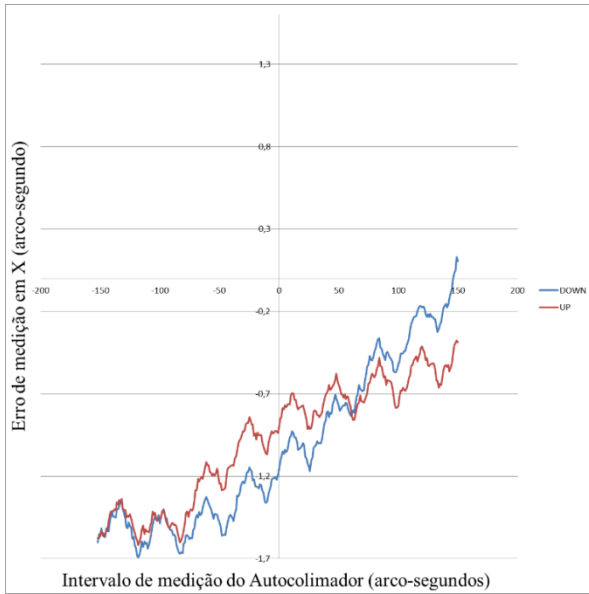


Figura 5.8 - Erro de Medição em X da Medição n°4 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

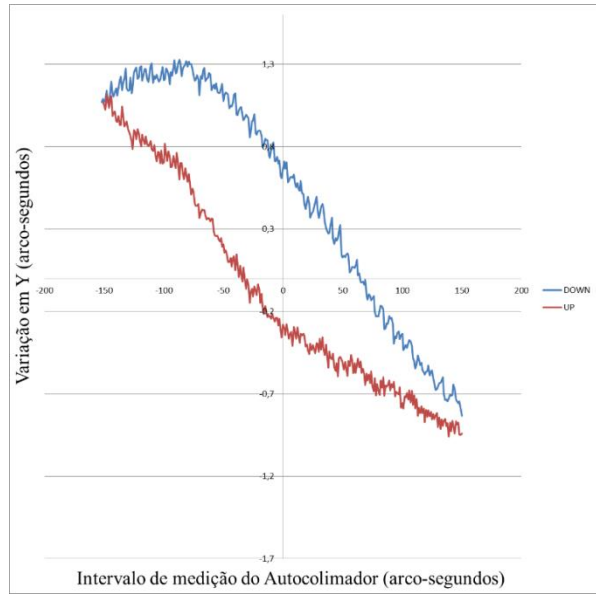


Figura 5.9 - Variação em Y da Medição n°4 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

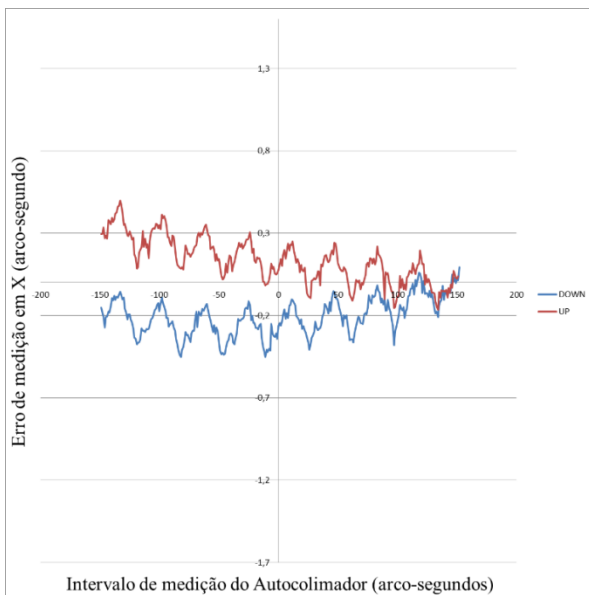


Figura 5.10 - Erro de Medição em X da Medição n°5 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

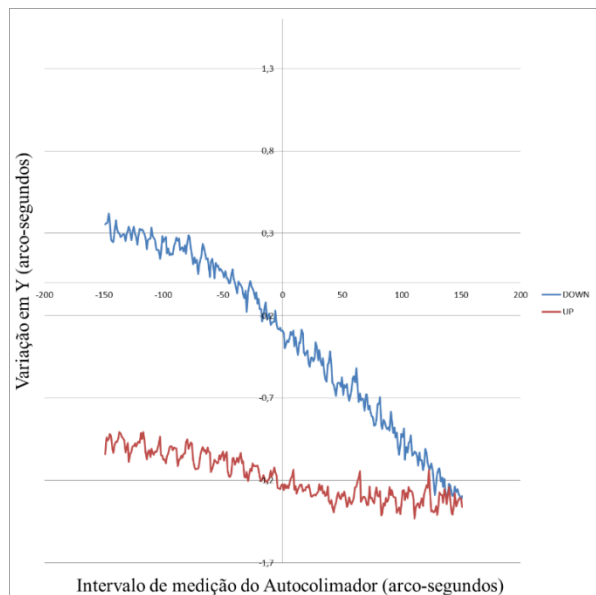


Figura 5.11 - Variação em Y da Medição n°5 com Posição Inicial de Referência igual a 0°

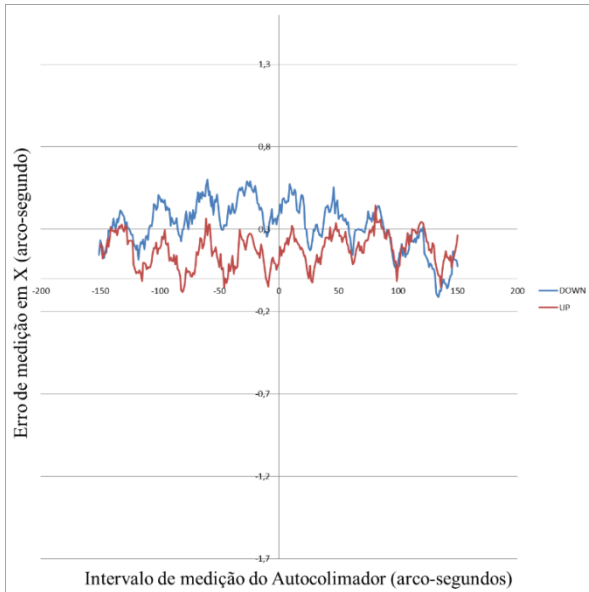


Figura 5.12 - Erro de Medição em X da Medição n°6 com Posição Inicial de Referência igual a 45°

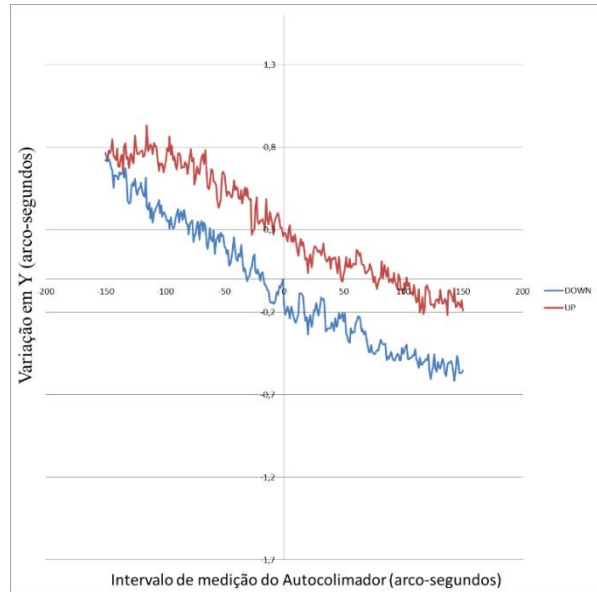


Figura 5.13 - Variação em Y da Medição n°6 com Posição Inicial de Referência igual a 45°

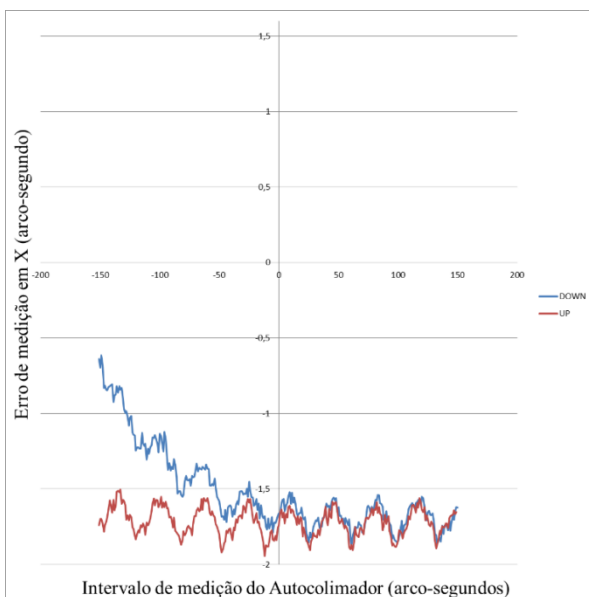


Figura 5.14 - Erro de Medição em X da Medição n°7 com Posição Inicial de Referência igual a 90°

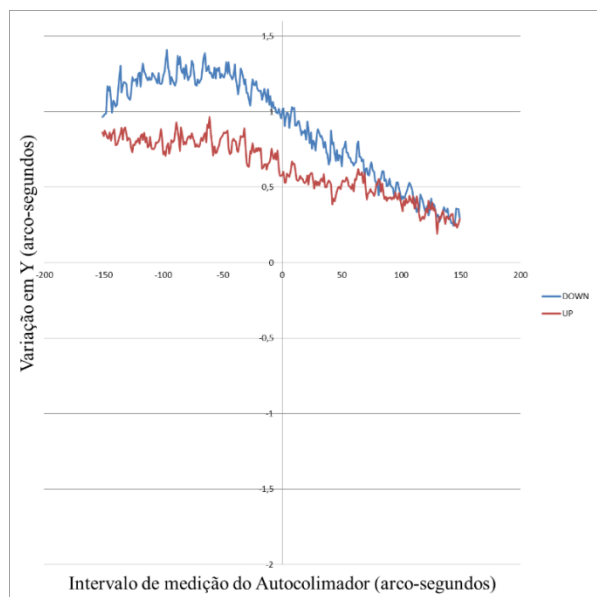


Figura 5.15 - Variação em Y da Medição n°7 com Posição Inicial de Referência igual a 90°

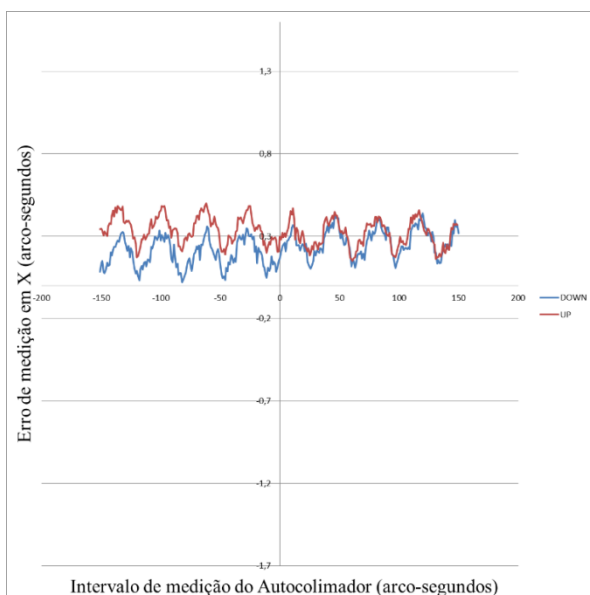


Figura 5.16 - Erro de Medição em X da Medição nº8 com Posição Inicial de Referência igual a 90°

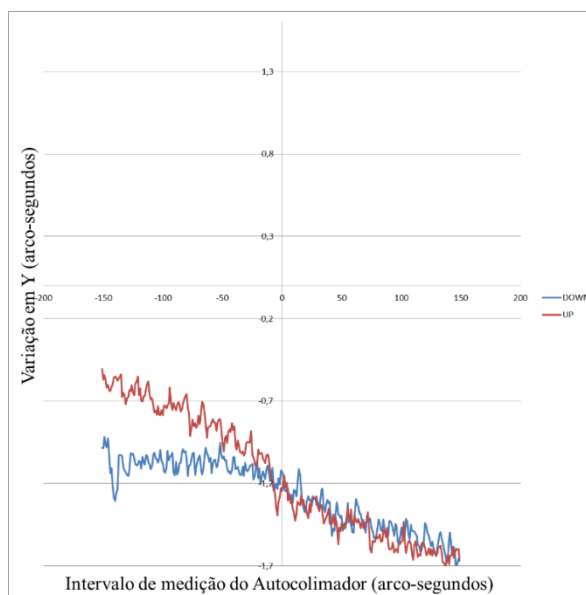


Figura 5.17 - Variação em Y da Medição nº8 com Posição Inicial de Referência igual a 90°

O valor final obtido para o erro de medição do autocolimador, δ , dado pela média dos valores dos 5 ciclos é apresentado, em forma gráfica, no certificado de calibração respectivo.

5.3 Critérios de Aceitação dos Valores Medidos

De acordo com os requisitos gerais de competência para laboratórios de calibração definidos na norma de Gestão da Qualidade NP EN ISO/IEC 17025 para as atividades de calibração e em especial para metidos de medição não normalizados, deve ser estabelecido o critério de aceitação e/ou requisitos de valores medidos. Assim, com base na experiência de outras realizações de calibrações descritos no capítulo anterior e com base no programa de execução da comparação internacional de autocolimadores³, definiu-se como critério de aceitação todas as medições em que a média do desvio angular do autocolimador obtida nas duas medições de um ciclo fosse superior a 1". Do exposto, para a realização dos próximos subcapítulos: 5.4 “*Balanço de Incerteza*” e 5.5 “*Resultado da Medição*”, apenas foram consideradas as medições 2,3,5,6 e 8 das 8 medições apresentadas, por serem estas as que cumprem o critério de aceitação definido.

³ Technical Protocol EURAMET.L-K3a.2009 *Angle Comparison Using an Autocollimator* (Project # 1074)

5.4 Balanço de Incerteza

Considerou-se para o caso presente, ou seja para a calibração do autocolimador as seguintes fontes de incerteza:

- a) Resolução dos dados adquiridos pelo autocolimador, $u_1(res_AC)$

O autocolimador é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_1(res_AC) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 5.2}$$

- b) Componente proveniente da calibração da mesa rotativa, $u_2(incer_MR)$

A incerteza-padrão $u_2(incer_MR)$, referente à mesa rotativa, é a apresentada no certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k :

$$u_2(incer_MR) = \frac{U(MR)}{k} \quad \text{Equação 5.3}$$

- c) Resolução dos dados adquiridos pela mesa rotativa, $u_3(res_MR)$

A mesa rotativa é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(res_MIR) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 5.4}$$

- d) A contribuição devida ao erro de histerese da mesa rotativa (Histerese), $u_4(Histerese_MR)$ é dada pela seguinte equação:

$$u_4(Histerese_MIR) = \sqrt{\frac{(\delta x)^2}{12}} \quad \text{Equação 5.5}$$

O valor da Histerese (δx) da mesa rotativa é o valor majorado da diferença entre valor medido indicado pela mesa rotativa entre o ciclo "Down" e "Up", para o mesmo ponto α

- e) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_5(reprod.)$ é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos (avaliação do tipo A):

$$u_5(reprod.) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 5.6}$$

Sendo n o número de valores medidos (4), x_i os valores medidos individualmente observados e \bar{x} a média aritmética desses valores.

Tendo em conta estas fontes de incerteza a incerteza-padrão combinada associada à calibração do Autocolimador é então dada por:

$$u_c(AC) = \sqrt{(u_1(res_AC))^2 + (u_2(incer_MR))^2 + (u_3(res_MR))^2 + (u_4(Histerese_MR))^2 + (u_5(reprod.))^2}$$

Equação 5.7

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(AC) \quad \text{Equação 5.8}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efectivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{V_i}} \quad \text{Equação 5.9}$$

A tabela seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza.

Tabela 5.2 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza

Grandeza Xi	Estimativa xi	Incerteza-padrão u(xi)	Coefficiente de sensibilidade ci	Distribuição/ Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão ui(y)
Resolução AC	R_{AC}	$u1 (res_{AC})$	1	Rectangular (Tipo B)	∞	0,00289"
Incerteza-padrão Mesa Rotativa	I_{MR}	$u2 (incer_{MR})$	1	Normal (Tipo B)	∞	0.05774"
Resolução Mesa Rotativa	R_{MR}	$u3 (res_{MR})$	1	Rectangular (Tipo B)	∞	0,00289"
Desvio de Medição da Mesa Rotativa (Histerese)	H_{MI}	$u4 (Histerese_{MR})$	1	Rectangular (Tipo B)	∞	0,35812"
Reprodutibilidade	$\sigma(\delta)$	$u5 (reprodu)$	1	Normal (Tipo A)	100	0,34812"
					$u_c(AC)$	0,501"

5.5 Resultado de Medição (Análise dos Valores Obtidos)

Um processo de calibração é concluído com a emissão do respetivo certificado de calibração, que deverá estar de acordo com o especificado no Sistema da Qualidade do laboratório, ou seja segue o estabelecido na Norma NP EN ISO/IEC 17025 [20].

O laboratório de comprimento tem implementado um impresso para a emissão de certificados de calibração de acordo com a norma e foi esse o documento utilizado para a apresentação dos resultados obtidos e discutidos nas alíneas anteriores. Em resumo, cada relatório de ensaio ou certificado de calibração deve incluir no mínimo a seguinte informação, a menos que o laboratório tenha razões válidas para não o fazer [20]:

- a) Um título (por exemplo, "Relatório de Ensaio" ou "Certificado de Calibração");
- b) O nome e a morada do laboratório, e o local onde os ensaios e/ou calibrações foram realizados, se não for o mesmo do laboratório;
- c) A identificação inequívoca do relatório de ensaio ou certificado de calibração (tal como o número de série), uma identificação em cada página que garanta que essa página seja reconhecida como fazendo parte desse relatório de ensaio ou certificado de calibração e uma identificação clara do final do relatório de ensaio ou certificado de calibração;
- d) O nome e a morada do cliente;
- e) A identificação do método utilizado;

- f) A descrição, estado e identificação inequívoca do(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s);
- g) A data de recepção do(s) item(ns) para ensaio ou calibração, sempre que esta seja essencial para a validade e utilização dos resultados, e a(s) data(s) da realização do ensaio ou calibração;
- h) Referência ao plano e aos procedimentos de amostragem utilizados pelo laboratório ou por outros organismos, sempre que estes sejam relevantes para a validade ou utilização dos resultados;
- i) Os resultados do ensaio ou calibração, incluindo quando apropriado as unidades de medição;
- j) O(s) nome(s), função(ões) e assinatura(s) ou identificação equivalente, da(s) pessoa(s) que autoriza(m) o relatório de ensaio ou certificado de calibração;
- k) Quando relevante, uma declaração em como os resultados se referem apenas aos itens ensaiados ou calibrados [20].

No anexo F2 é apresentada uma cópia do certificado de medição emitido, correspondente à calibração realizada do autocolimador.

6 Projeto de Calibração de Níveis Eletrônicos

O presente capítulo tem como objetivo desenvolver a tarefa da dissertação, referente ao estudo, desenvolvimento e implementação do processo de calibração de níveis eletrônicos.

O IPQ não fornece ainda este tipo de serviço de calibração. Neste capítulo será apresentada uma solução construtiva para a implementação do processo calibração de níveis eletrônicos, onde será descrito o tipo de equipamento a calibrar, a montagem tendo como base os equipamentos e acessórios existentes no laboratório bem como os dados a registrar e as suas incertezas associadas. Serão apresentadas soluções de melhorias, no que respeita a equipamentos para o fornecimento do serviço de calibração em questão.

A realização das tarefas anteriormente apresentadas nesta dissertação foi muito importante, pois com a sua execução foi possível obter conhecimentos a nível metrológico e experiência laboratorial, que permitiram levar à elaboração e realização deste projeto de calibração.

6.1 Estudo do Equipamento a Ser Calibrado

De modo a apresentar-se uma proposta viável para a implementação de calibração de níveis eletrônicos, foi fulcral o estudo prévio sobre o funcionamento dos níveis eletrônicos, tipos e de como evoluíram.

6.1.1 Sistemas de Medição de Inclinação

No sistema de medição de inclinação pode-se incluir equipamentos tais como: níveis de bolha, níveis eletrônicos ou inclinómetros, autocolimadores, interferómetros laser, entre outros.

Inclinação corresponde, neste contexto ao valor do desvio da horizontalidade e é correspondente a um ângulo específico. Em função do plano de referência pode-se distinguir entre inclinação absoluta ou inclinação relativa. A inclinação absoluta (Figura 6.1 (1)) corresponde ao ângulo α entre a reta g_3 e a reta horizontal g_4 , onde a reta horizontal g_4 encontra-se na intersecção entre o plano vertical E_1 e o plano horizontal (de referência) E_2 . A inclinação relativa (Figura 6.1 (2)) corresponde ao ângulo β entre a reta g_5 e a reta g_6 , encontrando-se as duas retas no plano vertical E_1 e nenhuma no plano horizontal E_2 [21].

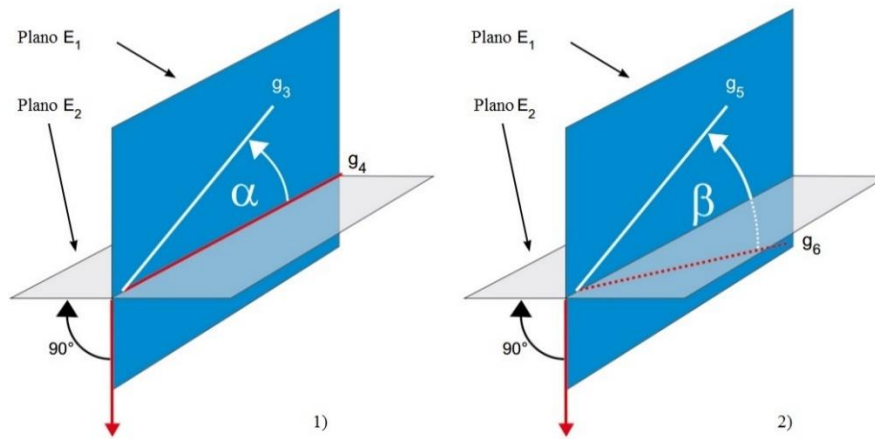


Figura 6.1 - Inclinação Absoluta (1) e Inclinação Relativa (2)

Nas calibrações de níveis eletrônicos, o método a implementar utiliza a descrição apresentada para a medição da inclinação absoluta.

6.1.1.1 Níveis de Bolha

Os níveis de bolha (Figura 6.2) são os dispositivos de medição de inclinação que antecedem aos níveis eletrônicos. Estes contêm uma ou várias cápsulas com líquido preenchido parcialmente com ar e que utilizam a força da gravidade para indicar, por meio do movimento da bolha, inclinações [22].

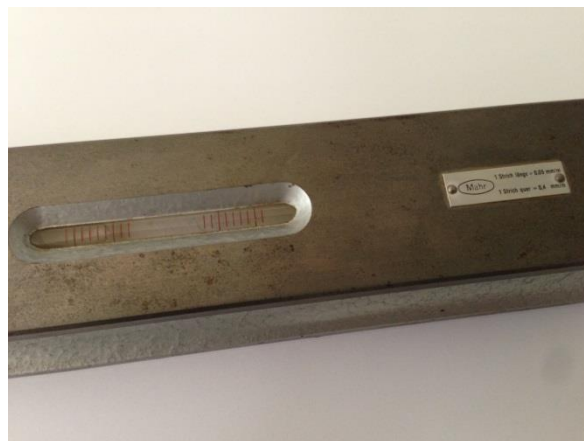


Figura 6.2 - Nível de Bolha com Resolução Horizontal de 0,05 mm/m.

Se um nível apresentar apenas marcações, podemos dizer que este permite realizar avaliações qualitativas sobre a inclinação de um plano.

Para a realização de avaliações quantitativas, tem que se ter em conta o tipo de marcas no frasco do nível, e a indicação da sua resolução.

As marcações nos frascos são avaliadas em três tipos: (Figura 6.3) [23]:

- Tipo A: marcação contínua;
- Tipo B: marcação descontínua, mas com pelo menos quatro marcas simetricamente em relação à bolha na posição de inclinação igual a zero;
- Tipo C: marcação de apenas duas marcas a delimitar a bolha na posição de inclinação igual a zero;

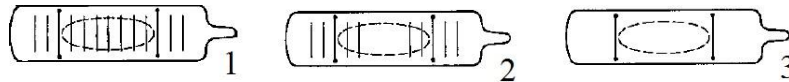


Figura 6.3 - Frasco com Marcação do Tipo A (1), Tipo B (2) ou Tipo C (3)

A escala deverá ser sempre assinalada simetricamente em relação à bolha na posição de inclinação igual a zero e para escalas do tipo A ou B, estas deverão ter divisões de escala uniformes, normalmente o espaçamento entre duas marcas consecutivas é de dois milímetros.

A exatidão do nível, também chamado valor da escala é o valor correspondente à menor inclinação que o nível pode medir. Por exemplo, o nível da Figura 6.2 tem uma resolução horizontal de 0,05 mm/m, o que significa que quando a bolha se move uma divisão de escala, equivale a uma inclinação (α) de 0,05 mm em cada metro, ou seja utilizando o triângulo apresentado na Figura 6.4, h será igual a 0,05 mm e L igual a 1000 mm. Através da aplicação da equação $\alpha = \arcsen(\frac{h}{L})$, tem-se α igual a 10,4".

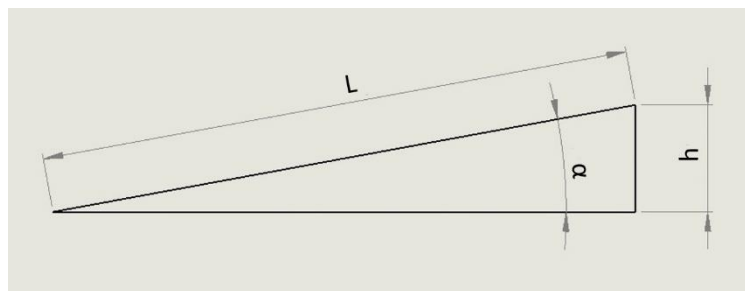


Figura 6.4 - Triângulo Retangular

Assim, para a realização de avaliações quantitativas apenas os níveis que possuem marcas nos seus frascos do Tipo A ou Tipo B e que apresentam a indicação da sua resolução pelo fabricante permitem este tipo de avaliação. Níveis com marcações do Tipo C permitem somente a realização de medições qualitativas [23].

6.1.1.2 Níveis Eletrônicos

O nível eletrônico (Figura 6.5) contém displays eletrônicos que apresentam quantitativamente o valor da inclinação dos planos, paralelamente alguns equipamentos têm também cápsulas com líquido preenchido parcialmente com ar funcionando como nível de bolha. É um sistema que proporciona uma medição mais exata, função da resolução do dispositivo afixador, pelo que deve ser utilizado quando há necessidade de realizar medições quantitativas com maior exatidão [24].



Figura 6.5 - Equipamento Constituído por um Nível com Display Eletrónico e Duas Cápsulas com Líquido Preenchido Parcialmente com Ar.

6.2 Planeamento Inicial do Projeto

Neste processo de calibração, a grandeza a avaliar é o ângulo plano e o parâmetro é o erro de medição dado pela diferença entre a indicação do nível eletrônico e o valor de referência. Tendo isso em atenção, será necessário ter como padrão pelo menos um equipamento de referência que trabalhe com grandezas da mesma natureza.

Um dos equipamentos metrológicos que mede no domínio angular é o autocolimador. O autocolimador é um sistema ótico, capaz de medir pequenas variações ou diferenças de posições angulares, sendo este uma possível solução a integrar na montagem como equipamento de referência.

Sendo fundamental gerar diferentes posições angulares, será imprescindível incluir na montagem um equipamento de trabalho que permita a geração de inclinações.

A Figura 6.6 apresenta uma proposta de montagem a efetuar para a calibração de níveis eletrônicos, tendo como base os equipamentos e acessórios disponíveis no laboratório.

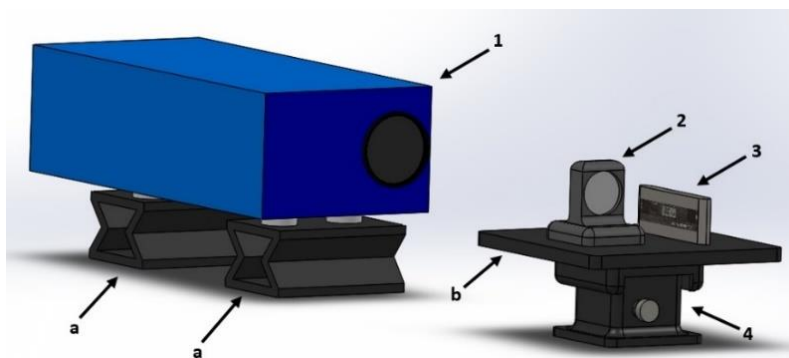


Figura 6.6 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrónicos e Equipamentos Disponíveis

Legenda:

1. Autocolimador (Padrão de referência);
2. Espelho Refletor;
3. Nível Eletrônico (Equipamento a Calibrar);
4. Mesa Niveladora;
- a) Elevador de Translação vertical;
- b) Plataforma acoplada à base da Mesa Niveladora.

6.3 Solução para o Projeto

Com base nos equipamentos que o IPQ possui, anteriormente descritos no capítulo 4 – “*Calibrações de Instrumentos de Medição de Ângulo*” partiu-se para a implementação de uma montagem de modo a utilizar-se esses equipamentos.

O IPQ dispõe de dois equipamentos de referência, (o autocolimador e o interferómetro laser), que podem ser utilizados neste processo de calibração. A montagem final apresentada incluirá a utilização dos dois.

6.3.1 Montagem

A Figura 6.7, Figura 6.8 e Figura 6.9 apresentam as fotografias de três montagens para calibração de níveis eletrónicos propostas. Não foi possível realizar a montagem com um nível eletrónico, pelo que será utilizado, como exemplo, no lugar do nível eletrónico, um nível de bolha.

6.3.1.1 Montagem com o Autocolimador

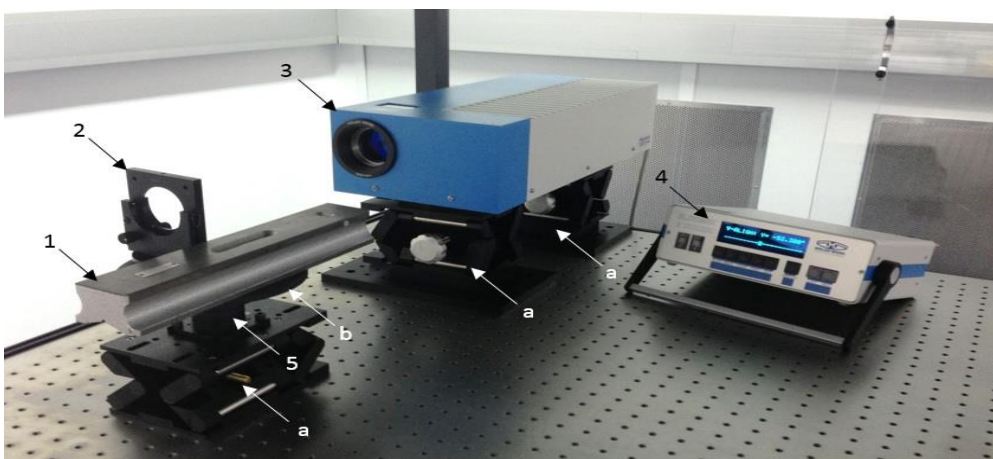


Figura 6.7 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrónicos Usando Apenas o Autocolimador ELCOMAT HR como Padrão de Referência

Legenda da Figura 6.7:

1. Nível de Bolha Mahr;
2. Espelho Refletor;
3. Autocolimador ELCOMAT HR;
4. Torre de Controlo do Autocolimador ELCOMAT HR;
5. Mesa Niveladora Newport;
- a) Elevador Vertical modelo 271 Newport;
- b) Base acoplada à Mesa Niveladora.

6.3.1.2 Montagem com o Sistema de Interferómetro Laser

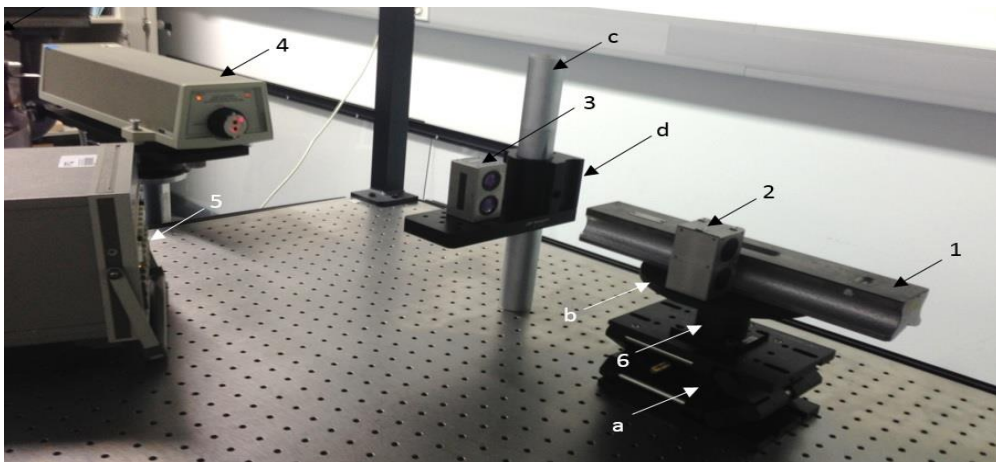


Figura 6.8 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrônicos Usando Apenas o Sistema de Interferómetro Laser como Padrão de Referência

Legenda da Figura 6.8:

1. Nível de Bolha Mahr;
2. Refletor Angular;
3. Interferómetro Angular;
4. Interferómetro Laser;
5. Torre de Controlo do Sistema de Interferómetro laser;
6. Mesa Niveladora Newport;
- a) Elevador Vertical modelo 271 Newport;
- b) Base Acoplada à Mesa Niveladora;
- c) Haste com Plataforma (d) Acoplada de Altura Ajustável.

6.3.1.3 Montagem com Autocolimador e Sistema de Interferómetro Laser

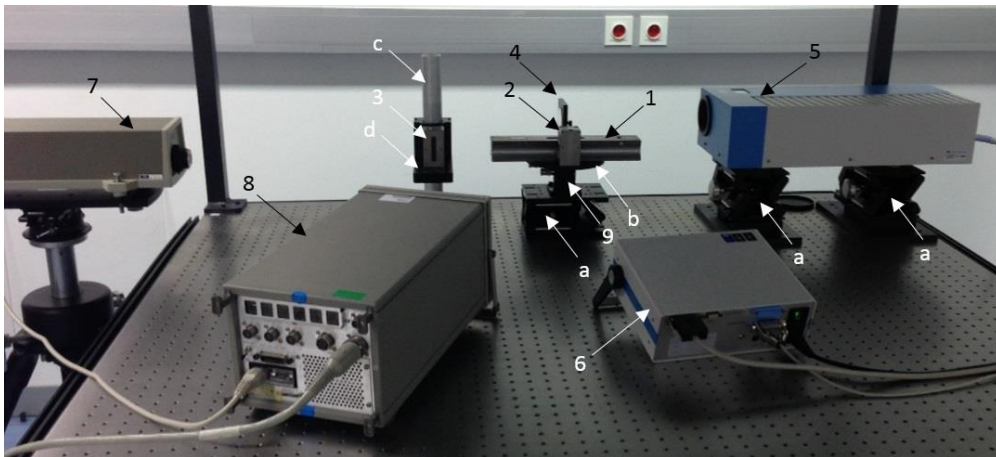


Figura 6.9 - Esquema de Montagem a Usar na Calibração de Níveis Eletrónicos Usando dois Sistemas de Referência, Autocolimador e Sistema de Interferómetro Laser

Legenda da Figura 6.9:

1. Nível de Bolha Mahr;
2. Refletor Angular;
3. Interferómetro Angular;
4. Espelho Refletor;
5. Autocolimador ELCOMAT HR;
6. Torre de Controlo do Autocolimador ELCOMAT HR;
7. Interferómetro Laser;
8. Torre de Controlo do Sistema de Interferómetro Laser;
9. Mesa Niveladora Newport;
 - a) Elevador Vertical modelo 271 Newport;
 - b) Base Acoplada à Mesa Niveladora;
 - c) Haste com Plataforma Acoplada de Altura Ajustável.

6.3.2 Modo Operatório

Como mencionado anteriormente, o modo operatório será descrito para a montagem com dois padrões de referência (Figura 6.9).

A sequência a realizar será a seguinte:

1. Sobre a base acoplada à mesa niveladora, colocar o nível a ser calibrado, o refletor angular, e o espelho refletor.
2. Coincidir o centro do nível com o centro da base, o centro do espelho refletor e o centro do refletor angular sobre o eixo y da base, como demonstrado na Figura 6.10.

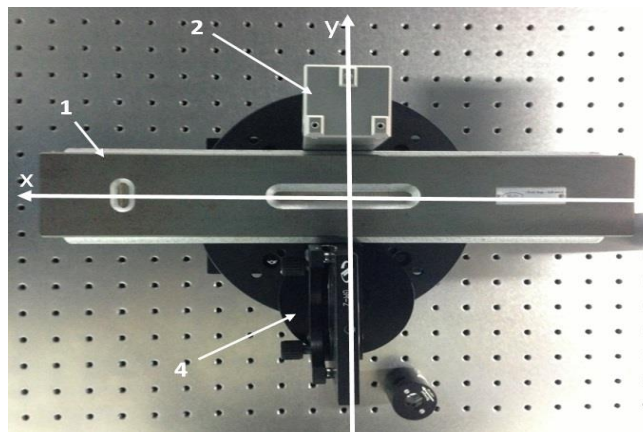


Figura 6.10 - Configuração da Posição do Nível a Calibrar (1), do Refletor Angular (2) e do Espelho Refletor (4) sobre a Base Acoplada à Mesa Niveladora (9)

3. Orientar o refletor angular e o espelho refletor de modo a que os seus eixos fiquem perpendiculares ao feixe ótico do interferómetro laser e do autocolimador respetivamente.
4. Colocar de seguida o interferómetro angular sobre a plataforma que está acoplada à haste.
5. Alinhar a mesa niveladora para inclinações igual a zero.
6. Alinhar o refletor angular com o interferómetro angular de modo a que as suas faces fiquem paralelas e à mesma altura (Figura 6.11).

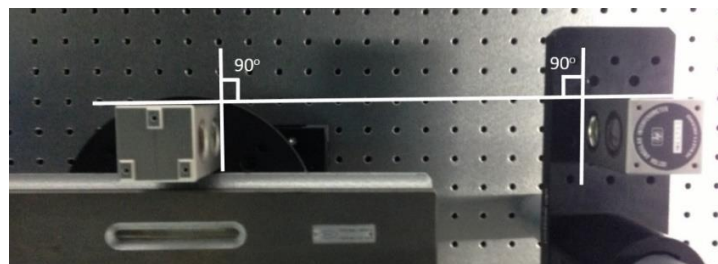


Figura 6.11 - Orientação das Faces do Refletor Angular e do Interferómetro Angular.

6.3.3 Execução da Calibração

Antes de iniciar a calibração, certificar se condições ambientais estão dentro dos limites seguintes:

- Temperatura: $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$
- Humidade Relativa: $(50 \pm 10) \%$

A calibração é realizada de acordo com os seguintes pontos:

- Seleção da gama de intervalos angulares, incluindo sempre que possível os dois extremos de medição do padrão a calibrar.
- Medir fazendo um ciclo simétrico (ida e volta) para compensar qualquer desvio.

6.3.4 Dados a Registrar e Avaliação

Os dados a registar para esta montagem são os seguintes:

- Valores Nominais α a calibrar;
- Valores de Referência do Autocolimador e do Sistema Interferómetro Laser HP;
- Valores indicados pelo Nível Eletrónico;

O erro de medição é obtido através da avaliação da diferença entre o valor medido pelo nível a calibrar e o valor de referência indicado pelo padrão utilizado (autocolimador ou Interferómetro laser).

A Tabela 6.1 apresenta um exemplo de tabela a preencher com os valores a registar e respetivo registo da avaliação do erro de medição.

Os valores nominais da tabela foram selecionados, e correspondem a um exemplo a propor para a calibração de um nível eletrónico com resolução $0,1^\circ$.

Tabela 6.1 - Dados a Registrar para Calibrações de Níveis Eletrônicos e Respetiva Avaliação.

Valor Nominal α	Valor medido no Autocolimador	Valor medido no Sistema Interferómetro Laser	Valor indicado pelo nível	Erro de medição entre Autocolimador e Nível (VIM §2.16)	Erro de medição entre Interferómetro HP e Nível (VIM §2.16)
10,0°					
8,0°					
6,0°					
4,0°					
2,5°					
2,0°					
1,5°					
1,0°					
0,5°					
-0,5°					
-1,0°					
-1,5°					
-2,0°					
-2,5°					
-4,0°					
-6,0°					
-8,0°					
-10,0°					

6.3.5 Balanço de Incertezas com o Padrão de Referência Autocolimador

Se utilizar como padrão de referência o autocolimador, as componentes ou as fontes de incerteza a incluir no balanço de incertezas serão as seguintes:

- a) A incerteza-padrão referente ao autocolimador, $u_1(incer_AC)$, é obtida a partir do valor da incerteza de medição expandida apresentada no certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k :

$$u_1(incer_AC) = \frac{U(AC)}{k} \quad \text{Equação 6.1}$$

- b) Resolução dos dados adquiridos pelo autocolimador, $u_2(res_AC)$

O autocolimador é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,01", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_2(res_AC) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,01}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.2}$$

c) Resolução dos dados adquiridos nível eletrônico, $u_3(res_Nível)$

O nível é um equipamento de leitura digital com resolução de x,xx'' , (sendo x,xx'' o valor da resolução do nível a ser calibrado em questão), pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(res_Nível) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{x,xx}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.3}$$

d) Resolução da mesa niveladora, $u_4(res_Mesa\ Niv.)$

A incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_4(res_Mesa\ Niv.) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{7200}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.4}$$

e) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_5(reprod_Nível)$ é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_5(reprod_Nível) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 6.5}$$

Sendo n o número de valores medidos, x_i os valores medidos individualmente observados e \bar{x} a média aritmética desses valores.

A incerteza-padrão combinada associada ao processo de calibração de níveis eletrônicos com padrão de referência o autocolimador, é determinada pela seguinte expressão:

$$u_c(y) = \sqrt{(u_1(incer_AC))^2 + (u_2(res_AC))^2 + (u_3(res_Nível))^2 + (u_4(res_Mesa\ Niv.))^2 + (u_5(reprod_Nível))^2} \quad \text{Equação 6.6}$$

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(y) \quad \text{Equação 6.7}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo facto de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efetivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{V_i}} \quad \text{Equação 6.8}$$

A Tabela 6.2 seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza do processo de calibração de níveis eletrónicos quando o padrão de referência é o autocolimador.

Tabela 6.2 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Níveis Eletrónicos com Padrão de Referência o Autocolimador.

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	C_i			$u_i(y)$
Incerteza-padrão AC		$u_1(incer_AC)$		Normal (Tipo B)		
Resolução AC		$u_2(res_AC)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Nível		$u_3(resol_Nível)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Mesa Niveladora		$u_4(res_Mesa\ Niv.)$		Retangular (Tipo B)		
Reprodutibilidade Nível		$u_5(reprodu_Nível)$		Normal (Tipo A)		
					$u_c(y)$	

6.3.6 Balanço de Incertezas em o Padrão de Referência Interferómetro Laser HP

Se utilizar como padrão de referência o Interferómetro Laser HP, as componentes a incluir no balanço de incertezas serão as seguintes:

- a) Componente proveniente do padrão interferómetro HP, $u_1(incer_HP)$

A incerteza-padrão $u_1(incer_HP)$, referente ao interferómetro HP, é o resultado da variância das componentes resultantes do Certificado de calibração, para um determinado fator de expansão k , da repetibilidade para $n=1000$ aquisições de indicação de distância, da resolução e da incerteza da equação d'Edlen.

- b) Resolução dos dados adquiridos pelo interferómetro HP, $u_2(res_HP)$

O Interferómetro HP é um equipamento de leitura digital com resolução de 0,1", pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_2(res_HP) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{0,1}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.9}$$

- c) Resolução dos dados adquiridos nível eletrónico, $u_3(res_Nível)$

O nível é um equipamento de leitura digital com resolução de x,xx", (sendo x,xx" o valor da resolução do nível a ser calibrado em questão), pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(res_Nível) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{x,xx}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.10}$$

- d) Resolução da mesa niveladora, $u_4(res_Mesa\ Niv.)$

A incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_4(res_Mesa\ Niv.) = \sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\frac{7200}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 6.11}$$

- e) Reprodutibilidade das medições efetuadas, $u_5(reprod_Nível)$ é obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores medidos:

$$u_5(reprod_Nível) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 6.12}$$

Sendo n o número de valores medidos (mínimo =4), x_i os valores medidos individualmente observados e \bar{x} a média aritmética desses valores.

A incerteza-padrão combinada associada ao processo de calibração de níveis eletrônicos com padrão de referência o Sistema Interferómetro Laser *HP*, é determinada pela seguinte expressão:

$$u_c(ne) = \sqrt{(u_1(incер_HP))^2 + (u_2(res_HP))^2 + (u_3(res_Nível))^2 + (u_4(res_Mesa\ Niv.))^2 + (u_5(reprod_Nível))^2}$$

Equação 6.13

A incerteza expandida associada à medição é dada por:

$$U = k \times u_c(ne) \quad \text{Equação 6.14}$$

A incerteza expandida apresentada será expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo facto de expansão $k= XX$, o qual para uma distribuição-t com $V_{ef} = YY$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %.

Sendo o número de graus de liberdade efetivos calculados de acordo com a expressão:

$$V_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 6.15}$$

A Tabela 6.3 seguinte apresenta o resumo das grandezas componentes do balanço de incerteza do processo de calibração de níveis eletrônicos quando o padrão de referência é o sistema interferómetro laser *HP*.

Tabela 6.3 - Resumo das Grandezas Componentes do Balanço de Incerteza do Processo de Calibração de Níveis Eletrônicos com Padrão de Referência o Sistema Interferómetro Laser HP.

Grandeza	Estimativa	Incerteza-padrão	Coefficiente de sensibilidade	Distribuição/Avaliação	n	Contribuição para a incerteza-padrão
X_i	x_i	$u(x_i)$	C_i			$u_i(y)$
Incerteza-padrão HP		$u_1 (incer_HP)$		Normal (Tipo B)		
Resolução HP		$u_2 (res_HP)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Nível		$u_3 (resol_Nível)$		Retangular (Tipo B)		
Resolução Mesa Niveladora		$u_4 (res_Mesa Niv.)$		Retangular (Tipo B)		
Reprodutibilidade Nível		$u_5 (reprodu_Nível)$		Normal (Tipo A)		
					$u_c(y)$	

O certificado de calibração correspondente deverá incluir, na apresentação dos resultados, a avaliação do erro de medição, para cada valor nominal de α medido segundo o referido na Tabela 6.1 e o valor da incerteza expandida de medição, função do padrão de referência utilizado.

7 Estudo de Mesas Niveladoras

Com base na realização dos capítulos 5 e 6, concluiu-se que a mesa niveladora não é a mais adequada para calibrações futuras, devido à sua baixa sensibilidade e baixa resolução que dificulta a obtenção de posições angulares exatas. Ao longo de várias horas de calibração, esta não se mantém estável influenciando nos valores da calibração. Assim, foi feita uma pesquisa do mercado procurando algumas soluções para o problema da mesa. Estas passam por propor equipamentos com apenas um grau de liberdade beneficiando a sensibilidade e resolução. São apresentadas seguidamente algumas das soluções possíveis para substituir a mesa.

7.1 Soluções do Fabricante Newport

O fabricante Newport disponibiliza três tipos de mesas niveladoras:

- TGN80 (Figura 7.1);
- TGN120;
- TGN160.



Figura 7.1 - Mesa Niveladora – TGN80

Segue-se a tabela (Tabela 7.1), com as respectivas especificações:

Tabela 7.1 - Especificações das Mesas Niveladoras do Fabricante Newport [14]

Modelo	TGN80	TGN120	TGN160
Amplitude de Inclinação (Grau)	$\pm 2,86^\circ$	$\pm 2,86^\circ$	$\pm 2,86^\circ$
Resolução (arco-segundo)	20,6	13,8	10,3
Sensibilidade (arco-segundo)	2	1,5	1
Carga Máxima (N)	200	450	800
Peso (kgf)	1,2	3,8	8

As principais diferenças entre as especificações das três mesas niveladoras deste fabricante são as seguintes:

- Dimensão da Plataforma;
- Resolução;
- Sensibilidade;
- Carga Máxima.

A dimensão da plataforma não é importante na seleção de uma entre as três das mesas, pois é possível acoplar uma base de tamanho superior à plataforma caso seja necessário.

Para este tipo de trabalho, a resolução é sempre muito importante pois tem sempre influencia no balanço de incertezas, e quanto menor a resolução, menor a incerteza final do processo de calibração, sendo neste aspeto preferível a mesa niveladora TGN160 por ser a que tem menor resolução.

Como referenciado anteriormente, o objetivo deste equipamento para este projeto é criar posições angulares controladas. Supondo que para a calibração de um nível eletrónico será necessário realizar no mínimo ± 5 posições angulares diferentes, a sensibilidade deste equipamento vai ser um fator importante porque quanto maior a sensibilidade da mesa, mais fácil será para o operador obter a posição angular pretendida.

Tendo em conta os aspetos anteriores, a mesa niveladora do fabricante Newport mais benéfica, será a plataforma de referência TGN160.

7.2 Soluções do Fabricante Aerotech

- ATT185-3;
- ATT185-5 (Figura 7.2).

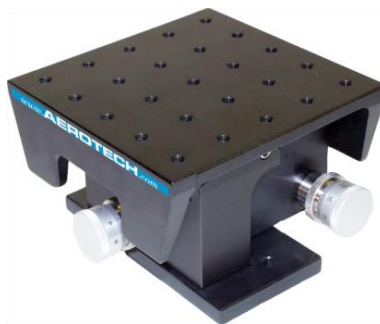


Figura 7.2 - Mesa Niveladora - ATT185-5

Tal como para as especificações das mesas da Newport, as da Aerotech também se diferenciam pelos mesmos parâmetros com exceção a carga máxima que suportam:

- Dimensão da Plataforma;
- Resolução;
- Sensibilidade;
- Peso.

Seguindo a mesma linha de raciocínio utilizada na escolha de uma das três mesas disponibilizadas pelo fabricante Newport, a mesa mais benéfica para este projeto do fabricante Aerotech é a ATT185-5 pela sua resolução e sensibilidade.

Segue-se a tabela (Tabela 7.2), com as respetivas especificações de cada plataforma de inclinações métricas:

Tabela 7.2 - Especificações das Mesas Niveladoras do Fabricante Aerotech

Modelo	ATT185-3	ATT185-5
Amplitude de Inclinação (Grau)	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$
Resolução⁴ (arco-segundo)	0,2	0,1
Sensibilidade (arco-segundo)	5	2.5
Carga Máxima (kg)	4,54	4,54
Peso (kgf)	0,5	1,41

7.3 Seleção da Mesa Niveladora

A mesa niveladora do fabricante Aerotech é a mais indicada, pois para além de ter uma resolução melhor que a plataforma da Newport, tem também uma amplitude de inclinação superior.

Esta mesa niveladora seria uma excelente melhoria para o laboratório, porque têm uma resolução muito menor e maior sensibilidade do que a mesa niveladora do IPQ, tornando assim a calibração mais fácil de realizar e mais exata.

⁴ Por movimento de 0,5° em fino ajustamento

8 Conclusões

A realização do estágio permitiu o aprofundamento dos conceitos teóricos de metrologia e a realização prática de trabalhos metrológicos no âmbito das medições angulares.

O presente trabalho decorreu de acordo com o plano de tarefas estabelecido inicialmente.

Foi efetuado o levantamento do estado da arte dos processos de calibração relacionados com as medições de grandezas angulares.

Inicialmente, através da realização prática de calibrações de padrões angulares, foi possível adquirir conhecimentos prévios sobre o Sistema da Qualidade implementado no laboratório que define, de acordo com a norma NP EN ISSO/IEC 17025:2005 [20] os requisitos para a realização de processos de calibração, nomeadamente no que respeita a padrões, condições de funcionamento, procedimento e métodos, apresentação de resultados entre outros.

Decorrente deste trabalho e da aplicação dos conhecimentos adquiridos sobre a avaliação da incerteza de medição, foi desenvolvido o procedimento para calibração de sutas no qual são utilizados os blocos padrão angulares como padrão de referência.

Das tarefas definidas para este trabalho, a realização do estudo do comportamento do autocolimador, em função da distância de feixe percorrido e da abertura ou largura do mesmo, quando da medição de pequenos desvios angulares, e o desenvolvimento e proposta de implementação de um novo processo de calibração de níveis eletrónicos, constituíram a atividade principal desta dissertação.

8.1 Análise de Resultados

No estudo da calibração do autocolimador foi necessário realizar várias medições até se concluir sobre qual o conjunto de condições de reprodutibilidade (diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas) a utilizar de modo a obter-se boa reprodutibilidade de medições (fidelidade ou precisão de medição). Para cada estudo de reprodutibilidade acresce ainda a necessidade de elaborar ou adaptar o programa de aquisição de dados respetivo.

A análise de cada uma das medições do erro em X e variação em Y obtidas para o autocolimador permitiu evoluir na definição das condições de reprodutibilidade, nomeadamente no que respeita ao número e intervalo de tempo entre aquisição e nivelção do autocolimador versus mesa niveladora e rotativa.

Dos resultados obtidos durante este processo de estudo de reprodutibilidade, foi possível concluir que a mesa niveladora que o laboratório L2 tem para a realização deste processo de medição

não apresenta estabilidade de modo a garantir uma repetibilidade dos valores a adquirir, dado que a aquisição dos mesmos pode levar mais de 24 horas.

Por este facto apenas foi possível realizar medições para uma distância percorrida pelo feixe do autocolimador de 300 mm.

Paralelamente foi realizado o trabalho para a implementação de um novo processo de calibração de níveis eletrónicos, tendo-se estudado várias soluções, quer a partir dos equipamentos já existentes no laboratório quer a partir da pesquisa de novos produtos e fornecedores.

8.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta dissertação conduziu ao melhoramento e inovação de processos metrológicos existentes no laboratório e abre portas para a realização de novos trabalhos, como por exemplo:

- Analisar o comportamento da estabilidade da mesa rotativa como fonte de incerteza a incluir no processo de calibração de autocolimadores;
- Analisar o comportamento da estabilidade da mesa niveladora;

Bibliografia

- [1] IPQ, Vocabulário Internacional de Metrologia, Caparica, 2012.
- [2] “Instituto Português da Qualidade,” IPQ / Capgemini , [Online]. Available: www.ipq.pt. [Acedido em 11 Maio 2013].
- [3] Instituto Português da Qualidade, Metrologia - em Síntese, Caparica: Tipografia Peres, 2001.
- [4] “Decreto-Lei nº 71/2012,” *Diário da República*, 1.^a série - Nº 58, 21 de Março de 2012.
- [5] “Decreto-Lei nº 128/2010,” *Diário da República*, 1.^a série - Nº 234, 3 de Dezembro de 2010.
- [6] “Bureau International des Poids et Mesures,” [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/si/>. [Acedido em 12 Maio 2013].
- [7] GUM, Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008, 1995.
- [8] “Portal Action,” [Online]. Available: <http://www.portalaction.com.br/>. [Acedido em 28 Agosto 2013].
- [9] Procedimento Técnico 1100108503-03 - Calibração de Blocos Angulares, LCM - Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [10] Hewlett-Packard Company, "User's Guide 5528A Laser Measurement System", Santa Clara, 1992.
- [11] P. Guedes, Metrologia Industrial, Lisboa: Edições Técnicas e Profissionais, ISBN 978-972-8480-27-1, 2011.
- [12] Tekniker, Manual de Instruções e Manutenção "Mesa Indexada com Elevada Exactidão", 1999.
- [13] “American Society for Precision Engineering,” [Online]. Available: http://www.aspe.net/publications/Annual_2003/PDF/3metro/2form/1296.PDF. [Acedido em 2 Setembro 2013].
- [14] Newport Corporation, “Newport Experience | Solutions,” [Online]. Available: <http://www.newport.com/>. [Acedido em 22 Julho 2013].
- [15] “HAAG-STREIT GROUP,” NEWIMPACT AG, [Online]. Available: <http://www.moeller-wedel-optical.com/>. [Acedido em 10 Julho 2013].
- [16] “Lufft,” [Online]. Available: <http://www.lufft.com/en/>. [Acedido em 13 Agosto 2013].

- [17] Procedimento Técnico 1100209505-02 - Calibração de Mesas Indexadas/Rotativas, LCM - Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [18] Procedimento Técnico 1100708529-03 - Calibração de Ópticas Angulares de Sistemas Interferométricos, LCM - Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [19] A. Just e R. D. Geckeler, EURAMET.L -K3a.2009 - Angle Comparison Using an Autocollimator, Alemanha, 2009.
- [20] NP EN ISO/IEC 17025:2005 - Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, 2ª ed., 2005.
- [21] WYLER AG, The Secrets of Inclination Measurement, Winterthur, 2012.
- [22] DIN 877 - "Inclination measuring instruments (levels)", 1986.
- [23] DIN 2276 Part 1 - "Inclination measuring systems; Cylindrical spirit level vials; Dimensions and requirements", 1986.
- [24] DIN 2276 Part 2 - Inclination measuring systems; Electronic inclination measuring systems; Types and requirements, 1986.

Bibliografia Consultada

- 1) A. Blanc, B. Declémenti e M. Chabreuil, *Mesures mécaniques et dimensionnelles*, 2008.
- 2) Bureau National de Métrologie, *La métrologie scientifique en France*, 2005.
- 3) D. Dixon, *Another Viewpoint on Plane Angle*, 1986.
- 4) H. Gerling, *Medición de longitudes*, Reverté, 2002.
- 5) IPQ, Padrões Metrológicos Nacionais e Certificados de Calibração e de Medição emitidos por Laboratórios Nacionais de Metrologia, Lisboa, 2000.
- 6) IPQ, Qualirama - Metrologia, 1999.
- 7) ISO 80000-3 - *Quantities and units - Part 3: Space and time*, 2006.
- 8) ISO 2538 - *Geometrical Product Specifications (GPS) - Series of angles and slopes on prisms*, 1998.
- 9) A. Just, M. Krause, R. Probst e R. Wittekopf, *Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator*, 2012.
- 10) I. Mills, B. Taylor e A. J. Thor, *Definitions of the units radian, neper, bel and decibel*, 2001.
- 11) Mitutoyo, Catálogo de Instrumentos de Medição, 2008.
- 12) Newport, *The Newport Resource*, 2007.
- 13) Sociedade Portuguesa de Metrologia, *Medições e Ensaios*, 2013.
- 14) A. B. Torrens, *On Angles and Angular Quantities*, 1986.
- 15) H. Wittmann, *A New Approach to the Plane Angle*, 1988.

Anexos

Anexo A: Certificado de Calibração de Mesas Indexadas/Rotativa

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel 212 948 185
Fax 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.02 / 1340299

PÁGINA 1 de 2

ENTIDADE

NOME ACTF – Domínio Ângulo
ENDEREÇO Rua António Gião, 2; 2829-513 Caparica

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Mesa Rotativa, MI2
MARCA TEKNIKER
MODELO M338.MDI.P
NÚMERO M338
CONSTITUIÇÃO -----

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO -----
INTERVALO DE INDICAÇÃO 0° a 360°
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 0,01''

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração
DATA 2013-05-23
MÉTODO *Cross Calibration*
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA PT1100209505
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI, através do padrão IPQ Autocolimador
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA $t = (20,0 \pm 1,0) \text{ } ^\circ\text{C}$;
INCERTEZA EXPANDIDA 1,0''
RESULTADO Ver página 2

CAPARICA, 23 de maio de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.02 / 1340299

PÁGINA 2 de 2

Método de Medição:

O Método baseia-se na subdivisão de um círculo. A soma de todos os ângulos intermédios de um círculo é 360° e a soma de todos os erros dos mesmos ângulos intermédios é zero assim, através de matrizes e equações é determinado o erro de cada ângulo intermédio do círculo.

Foram utilizados como sistemas de referência os seguintes equipamentos:

Autocolimador Moller Wedel, n.º série 152

Polígono Padrão de 9 faces Rank Taylor Hobson, n.º série 0150

Resultados:

Ângulo	Erro de Medição
0° 00' 00"	-0,10"
40° 00' 00"	-0,02"
80° 00' 00"	-0,03"
120° 00' 00"	0,01"
160° 00' 00"	0,09"
200° 00' 00"	0,06"
240° 00' 00"	0,07"
280° 00' 00"	-0,04"
320° 00' 00"	-0,03"

Notas

1. A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,0$, o qual para uma distribuição- t com $v_{ef} = \infty$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, dezembro 2005)".
2. A incerteza expandida apresentada corresponde à incerteza expandida indicada na Capacidade de Medição e Calibração (CMC), incluída no anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA). A incerteza expandida obtida neste processo de calibração foi de $U = 0,07''$.
3. A estabilidade a longo prazo do instrumento de medição não foi considerada.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

Anexo B: Certificado de Calibração de um Polígono

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel 212 948 185
Fax 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.04 / 1341118

PÁGINA 1 de 2

ENTIDADE

NOME ACTF – Domínio Ângulo
ENDEREÇO Rua António Gião, 2; 2829-513 Caparica

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Polígono de 9 faces
MARCA Rank Taylor Hobson
MODELO -----
NÚMERO 150
CONSTITUIÇÃO -----

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO -----
INTERVALO DE INDICAÇÃO 0° a 360°
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 40°

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração
DATA 2013-05-23
MÉTODO *Cross Calibration*
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA PT1100408502
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI, através do padrão IPQ Autocolimador
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA $t = (20,0 \pm 1,0) \text{ °C}$;
INCERTEZA EXPANDIDA 1,0"
RESULTADO Ver página 2

CAPARICA, 29 de maio de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.04 / 1341118

PÁGINA 2 de 2

Método de Medição:

O Método baseia-se na subdivisão de um círculo. A soma de todos os ângulos intermédios de um círculo é 360° e a soma de todos os erros dos mesmos ângulos intermédios é zero assim, através de matrizes e equações é determinado o erro de cada ângulo intermédio do círculo.

Foram utilizados como sistemas de referência os seguintes equipamentos:
Autocolimador Moller Wedel, n.º série 152

Resultados:

Face do polígono	Erro de Medição
0°	-0,2"
40°	-1,3"
80°	0,3"
120°	0,4"
160°	-0,9"
200°	-0,7"
240°	-0,3"
280°	0,1"
320°	2,6"

Notas

1. A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,0$, o qual para uma distribuição- t com $v_{ef} = \infty$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, dezembro 2005)".
2. A incerteza expandida apresentada corresponde à incerteza expandida indicada na Capacidade de Medição e Calibração (CMC), incluída no anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA). A incerteza expandida obtida neste processo de calibração foi de $U = 0,2''$.
3. A estabilidade a longo prazo do instrumento de medição não foi considerada.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

Anexo C1: Valores da Medição de um Bloco Angular

Data		01-08-2013		temp. [°]:		20,5	
Medição 1							
Ciclo 1							
xi () : xf ()							
1	2	-0,000003	1,951	0	xi 1		
1	3	0	53,104	0	yi1	xi	yi
1	2	134,999995	1,809	0	xf 1	1	1,951
1	3	134,999993	23,316	0	yf 1	2	1,915
1	2	-0,000001	1,915	0	xi 2	3	1,869
1	3	0	52,791	0	yi2	4	1,809
1	2	134,999994	1,763	0	xf 2	5	1,806
1	3	134,999993	23,798	0	yf 2	6	1,787
1	2	0,000007	1,869	0	xi 3	7	1,737
1	3	0,000012	52,698	0	yi3	8	1,661
1	2	134,999986	1,685	0	xf 3	9	1,722
1	3	134,999998	23,853	0	yf 3	10	1,663
1	2	0,000011	1,809	0	xi 4	11	1,583
1	3	0,000015	52,502	0	yi4	12	1,604
1	2	134,999996	1,661	0	xf 4	média	1,759
1	3	134,999995	24,035	0	yf 4	s	0,119
1	2	0,000012	1,806	0	xi 5		0,365
1	3	0,000016	52,379	0	yi5		0,090
1	2	135	1,635	0	xf 5		24,92
1	3	134,999998	24,083	0	yf 5		-0,055
1	2	0,00001	1,787	0	xi 6		-0,118
1	3	0,000011	52,298	0	yi6		0,855
1	2	135,000007	1,673	0	xf 6		
1	3	135,000003	24,29	0	yf 6		
1	2	0,000004	1,737	0	xi 7		
1	3	0,000004	52,169	0	yi7		
1	2	134,999999	1,64	0	xf 7		
1	3	134,999995	24,507	0	yf 7		
1	2	0,000004	1,661	0	xi 8		
1	3	0,00001	52,206	0	yi8		
1	2	135,000002	1,63	0	xf 8		
1	3	135	24,618	0	yf 8		
1	2	0,000012	1,722	0	xi 9		
1	3	0,000016	52,19	0	yi 9		
1	2	134,999998	1,589	0	xf 9		
1	3	134,999995	24,645	0	yf 9		
1	2	0,000022	1,663	0	xi 10		
1	3	0,000025	51,998	0	yi 10		
1	2	134,999989	1,579	0	xf 10		
1	3	134,999985	24,744	0	yf 10		
1	2	0,000014	1,583	0	xi 11		
1	3	0,000018	51,96	0	yi 11		
1	2	134,999993	1,477	0	xf 11		
1	3	134,999991	24,843	0	yf 11		
1	2	0,000011	1,604	0	xi 12		
1	3	0,000012	51,9	0	yi 12		
1	2	135	1,549	0	xf 12		
1	3	134,999996	24,92	0	yf 12		
Ciclo 2							
1	2	0,000008	1,777	0	xi 1		
1	3	0,000007	73,083	0	yi1	xi	yi
1	2	225,000005	2,644	0	xf 1	1	1,777
1	3	225,000002	1,522	0	yf 1	2	1,902
1	2	0,000012	1,902	0	xi 2	3	1,885
1	3	0,000013	73,106	0	yi2	4	1,957
1	2	224,999989	2,587	0	xf 2	5	1,861
1	3	224,999987	1,672	0	yf 2	6	1,973
1	2	0,00001	1,885	0	xi 3	7	1,902
1	3	0,000018	73,207	0	yi3	8	1,789
1	2	224,999998	2,575	0	xf 3	9	1,795
1	3	224,999998	1,956	0	yf 3	10	1,789
1	2	0,000031	1,957	0	xi 4	11	1,813
1	3	0,000043	73,057	0	yi4	12	1,75
1	2	224,999998	2,581	0	xf 4	média	1,849
1	3	224,999996	2,188	0	yf 4	s	0,074
1	2	0,000014	1,861	0	xi 5		0,132
1	3	0,000016	73,212	0	yi5		0,069
1	2	224,999997	2,486	0	xf 5		2,515
1	3	224,999995	2,316	0	yf 5		2,575
1	2	0,00001	1,973	0	xi 6		-0,665
1	3	0,000016	73,295	0	yi6		0,080

Média (medição 1)	-0,12
-------------------	-------

				s (medição 1)	
1	2	224,999992	2,537	0	xf 6
1	3	224,999989	2,58	0	yf 6
1	2	0,000008	1,902	0	xi 7
1	3	0,00001	73,211	0	yi 7
1	2	224,999992	2,469	0	xf 7
1	3	224,99999	2,748	0	yf 7
1	2	0,000016	1,789	0	xi 8
1	3	0,000023	73,313	0	yi 8
1	2	224,999993	2,509	0	xf 8
1	3	224,999989	2,787	0	yf 8
1	2	0,000025	1,795	0	xi 9
1	3	0,00003	73,262	0	yi 9
1	2	224,999989	2,425	0	xf 9
1	3	224,999985	3,056	0	yf 9
1	2	0,000017	1,789	0	xi 10
1	3	0,000024	73,253	0	yi 10
1	2	224,999992	2,457	0	xf 10
1	3	224,999989	3,176	0	yf 10
1	2	0,00001	1,813	0	xi 11
1	3	0,000013	73,494	0	yi 11
1	2	225,000002	2,468	0	xf 11
1	3	224,999999	3,429	0	yf 11
1	2	0,000011	1,75	0	xi 12
1	3	0,000019	73,436	0	yi 12
1	2	224,999988	2,437	0	xf 12
1	3	224,999987	3,471	0	yf 12

02-08-2013

Medição 2										
Ciclo 1										
1	2	89,999994	0,768	0	xi 1					
1	3	89,999993	3,121	0	yi 1	xi	yi	xf	yf	xf - xi
1	2	224,999994	1,028	0	xf 1	1	0,768	3,121	1,028	-8,805
1	3	224,999993	-8,805	0	yf 1	2	0,78	3,287	1,026	0,246
1	2	90,000015	0,78	0	xi 2	3	0,931	3,301	1,166	-8,37
1	3	90,000017	3,287	0	yi 2	4	0,983	3,407	1,172	0,235
1	2	224,999996	1,026	0	xf 2	5	1,063	3,416	1,26	-8,245
1	3	224,999992	-8,568	0	yf 2	6	1,15	3,467	1,254	0,189
1	2	90,000016	0,931	0	xi 3	7	1,118	3,5	1,444	-11,652
1	3	90,000022	3,301	0	yi 3	8	1,299	3,702	1,381	-8,205
1	2	224,999998	1,166	0	xf 3	9	1,216	3,704	1,41	0,197
1	3	224,999994	-8,37	0	yf 3	10	1,249	3,721	1,381	-11,6
1	2	90,000014	0,983	0	xi 4	11	1,361	3,712	1,514	-7,875
1	3	90,000016	3,407	0	yi 4	12	1,402	3,791	1,443	0,132
1	2	224,999991	1,172	0	xf 4	média	1,110	3,511	1,290	-7,805
1	3	224,999987	-8,245	0	yf 4	s	0,212	0,214	0,165	0,153
1	2	90,000014	1,063	0	xi 5					-7,776
1	3	90,000018	3,416	0	yi 5					0,041
1	2	225,000005	1,26	0	xf 5					-11,46
1	3	225,000003	-8,205	0	yf 5					0,326
1	2	90,00001	1,15	0	xi 6					-11,442
1	3	90,000019	3,467	0	yi 6					-7,942
1	2	224,99999	1,254	0	xf 6					0,326
1	3	224,999986	-8,133	0	yf 6					-11,442
1	2	90,000005	1,118	0	xi 7					-7,892
1	3	90,000011	3,5	0	yi 7					0,082
1	2	225	1,444	0	xf 7					-11,594
1	3	224,999994	-7,942	0	yf 7					-11,579
1	2	90,000014	1,299	0	xi 8					-11,526
1	3	90,000021	3,702	0	yi 8					-11,488
1	2	224,999996	1,381	0	xf 8					-11,488
1	3	224,999992	-7,892	0	yf 8					-11,488
1	2	90,000007	1,216	0	xi 9					-11,488
1	3	90,000011	3,704	0	yi 9					-11,488
1	2	225	1,41	0	xf 9					-11,488
1	3	224,999999	-7,875	0	yf 9					-11,488
1	2	90,000011	1,249	0	xi 10					-11,488
1	3	90,000016	3,721	0	yi 10					-11,488
1	2	224,999996	1,381	0	xf 10					-11,488
1	3	224,999993	-7,805	0	yf 10					-11,488
1	2	90,000017	1,361	0	xi 11					-11,488
1	3	90,000019	3,712	0	yi 11					-11,488
1	2	225,000003	1,514	0	xf 11					-11,488
1	3	225,000001	-7,776	0	yf 11					-11,488
1	2	90,000009	1,402	0	xi 12					-11,488
1	3	90,000012	3,791	0	yi 12					-11,488
1	2	224,999998	1,443	0	xf 12					-11,488
1	3	224,999995	-7,669	0	yf 12					-11,488

Ciclo 2										
1	2	90,000009	0,06	0	xi 1					
1	3	90,000012	-24,525	0	yi 1	xi	yi	xf	yf	xi - xf
1	2	314,999989	-0,209	0	xf 1	1	0,06	-24,525	-0,209	-30,433
						2	-0,212	-24,509	-0,222	0,269
										-5,908
										-6,003

1	3	314,999984	-30,433	0	<u>yf 1</u>	3	-0,307	-24,576	-0,451	-30,509	0,144	-5,933
1	2	90,000013	-0,212	0	xi 2	4	-0,44	-24,529	-0,594	-30,619	0,154	-6,09
1	3	90,000018	-24,509	0	yi2	5	-0,553	-24,531	-0,698	-30,774	0,145	-6,243
1	2	315,000008	-0,222	0	xf 2	6	-0,594	-24,487	-0,701	-30,745	0,107	-6,258
1	3	315,000005	-30,512	0	<u>yf 2</u>	7	-0,649	-24,432	-0,678	-30,764	0,029	-6,332
1	2	90,000012	-0,307	0	xi 3	8	-0,734	-24,554	-0,837	-30,705	0,103	-6,151
1	3	90,000017	-24,576	0	yi3	9	-0,754	-24,424	-0,875	-30,703	0,121	-6,279
1	2	315	-0,451	0	xf 3	10	-0,729	-24,42	-0,917	-30,716	0,188	-6,296
1	3	314,999997	-30,509	0	<u>yf 3</u>	11	-0,831	-24,433	-0,783	-30,743	-0,048	-6,31
1	2	90,000001	-0,44	0	xi 4	12	-0,784	-24,424	-0,867	-30,84	0,083	-6,416
1	3	90,000013	-24,529	0	yi4	média	-0,544	-24,487	-0,653	-30,672	0,109	-6,185
1	2	314,999999	-0,594	0	xf 4	s	0,271	0,058	0,243	0,126	0,084	0,166
1	3	314,999996	-30,619	0	<u>yf 4</u>							
1	2	90,000004	-0,553	0	xi 5							
1	3	90,000008	-24,531	0	yi5							
1	2	314,999997	-0,698	0	xf 5							
1	3	314,999996	-30,774	0	<u>yf 5</u>							
1	2	90,000016	-0,594	0	xi 6							
1	3	90,000019	-24,487	0	yi6							
1	2	314,999998	-0,701	0	xf 6							
1	3	314,999994	-30,745	0	<u>yf 6</u>							
1	2	90,000015	-0,649	0	xi 7							
1	3	90,000018	-24,432	0	yi7							
1	2	314,999999	-0,678	0	xf 7							
1	3	314,999997	-30,764	0	<u>yf 7</u>							
1	2	90,000008	-0,734	0	xi 8							
1	3	90,000015	-24,554	0	yi8							
1	2	314,999981	-0,837	0	xf 8							
1	3	314,999975	-30,705	0	<u>yf 8</u>							
1	2	90,000012	-0,754	0	xi 9							
1	3	90,000016	-24,424	0	yi 9							
1	2	314,999988	-0,875	0	xf 9							
1	3	314,999986	-30,703	0	<u>yf 9</u>							
1	2	90,000029	-0,729	0	xi 10							
1	3	90,000039	-24,42	0	yi 10							
1	2	315,000001	-0,917	0	xf 10							
1	3	314,999997	-30,716	0	<u>yf 10</u>							
1	2	90,000007	-0,831	0	xi 11							
1	3	90,000009	-24,433	0	yi 11							
1	2	314,999998	-0,783	0	xf 11							
1	3	314,999997	-30,743	0	<u>yf 11</u>							
1	2	90,000001	-0,784	0	xi 12							
1	3	90,000012	-24,424	0	yi 12							
1	2	314,999989	-0,867	0	xf 12							
1	3	314,999985	-30,84	0	<u>yf 12</u>							

Média (Medição 2)	0,14
s (Medição 2)	0,05

média	0,01
s	0,19

Anexo C2: Certificado de Calibração de Blocos Angulares

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel 212 948 185
Fax 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.01 / 134

PÁGINA 1 de 2

ENTIDADE

NOME
ENDEREÇO

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO	Blocos padrão angulares
MARCA	KOBA
MODELO	-----
NÚMERO	
CONSTITUIÇÃO	14 blocos padrão angulares

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO	-----
VALOR NOMINAL	Ver página 2
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR	-----

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO	Calibração
DATA	2013-08-05
MÉTODO	Procedimento técnico n.º 1100108503
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA	Às unidades SI, através do padrão IPQ Autocolimador N/S: 152
RASTREABILIDADE METROLÓGICA	Divisão de um círculo
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA	$t = 20\text{ °C}$
INCERTEZA EXPANDIDA	$U = 1,0''$
RESULTADO	Ver página 2

CAPARICA, 5 de Agosto de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.01 / 134

PÁGINA 2 de 2

Condições Ambientais: $t = (20,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$

Resumo do método:

Utilizando o Autocolimador Elcomat HR N/S 152 e a Mesa Rotativa Tekniker N/S M338 é determinada a diferença de valores entre as faces de medição do bloco padrão angular. O Resultado da Medição é obtido, adicionando ao valor nominal do bloco padrão angular essa diferença.

Resultados:

Valor nominal	Resultado de medição
45°	45° 00' 00,1"
30°	30° 00' 02,9"
15°	14° 59' 57,8"
5°	4° 59' 59,7"
3°	3° 00' 00,0"
1°	59' 58,8"
30'	29' 59,1"
20'	19' 59,5"
10'	10' 00,2"
5'	4' 58,7"
3'	2' 59,5"
1'	59,6"
30"	28,6"
10"	9,3"

Notas

A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,00$, o qual para uma distribuição- t com $\nu_{\text{ef}} > 50$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005)".

A estabilidade a longo prazo do instrumento de medição não foi considerada.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

Anexo D: Certificado de Calibração de Óticas Angulares

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel (+351) 212 948 185
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.07 / 1340166

PÁGINA 1 de 2

ENTIDADE

NOME ACTF- Domínio de Ângulo
ENDEREÇO Rua António Gião, 2, 2829-513 Caparica

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Óptica Angular
MARCA Hewlett Packard (HP)
MODELO 10770A
NÚMERO 1A01741; 2A01586
CONSTITUIÇÃO Interferómetro Angular e Reflector Angular

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO -----
INTERVALO DE INDICAÇÃO -----
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR -----

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração
DATA 2013-02-20
MÉTODO Ver página 2
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA Procedimento Técnico 1100708529
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI através do interferómetro HP, IPQ
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA $t = (20,0 \pm 0,5) \text{ } ^\circ\text{C}$;
INCERTEZA EXPANDIDA 0,50 μm
RESULTADO Ver página 2

CAPARICA, 20 de fevereiro de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.07 / 1340166

PÁGINA 2 de 2

Método de Medição:

Foram utilizados como sistemas de referência para a determinação do valor do entre-eixo, E , os seguintes equipamentos:

Laser interferométrico HP 5508A N/S 2948AO2352
Mesa Indexada Tekniker N/S M338

Para a realização da calibração fez-se coincidir o eixo de rotação da mesa indexada com o eixo de simetria do reflector angular. O reflector angular foi orientado de modo a que o seu eixo ficasse perpendicular ao feixe óptico do interferómetro. Com a mesa indexada geraram-se oito valores de ângulos $A_i = (\pm 15^\circ, \pm 12^\circ, \pm 10^\circ, \pm 8^\circ)$.

O valor do entre-eixo, E , foi determinado através da média dos valores obtidos para os ângulos gerados e usando a seguinte expressão:

$$2E = \frac{V(A)}{\sin(A)} + \frac{V(-A)}{\sin(-A)}$$

Onde, $2E$ representa a diferença do trajecto óptico entre os dois feixes reflectidos pelo reflector angular.

RESULTADO:

Valor do Entre-Eixo:

$$E = 32,58725 \text{ mm}$$

Notas:

A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,00$, o qual para uma distribuição- t com $v_{ef} = \infty$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, dezembro 2005)".

A estabilidade a longo prazo do instrumento de medição não foi considerada.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

Anexo E1: Procedimento de Calibração de Sutas

1. Designação

Calibração de Suta utilizando blocos padrão angulares.
Bevel Protractor Calibration using angular gauge blocks.

2. Objetivo e Âmbito

Estabelecer o método e sequência a usar na calibração de Sutas

3. Definições

Suta^[1]

A suta é um instrumento que nos permite medir, verificar por comparação ou transferir ângulos, ou seja, permite-nos conhecer o estado de determinada grandeza de uma peça, comparando-a com um padrão de valor conhecido.

Blocos Padrão Angulares

Blocos padrão angulares são padrões de ângulo, construídos em material resistente, com um par de planos correspondentes às faces de medição, e cujas faces de medição têm propriedade de aderirem a outras faces ou planos, com um tratamento superficial idêntico, através de forças moleculares, permitindo a geração de vários valores nominais de ângulo.

4. Referências

- [1] BS 1685:2008 Bevel protractors (mechanical and optical) – Requirements and test methods
- [2] Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração”, (IPQ, 2ª Edição, dezembro” 2005).

5. Descrição

Descrição do item a calibrar

O item a calibrar é o equipamento de medição de ângulos: suta.

Parâmetros, Grandezas e gamas de medição

O parâmetro em avaliação é o erro de medição dado pela diferença entre a indicação na suta e o valor de referência.

A grandeza em avaliação é o ângulo plano.

A gama de medição é de 00°00' a 90°00' a 00°00'.

Padrões de trabalho

Plano de referência. Paralelo óptico.

Padrões de referência

Blocos Padrão Angulares.



Figura 1 - Blocos Padrão angulares

Condições de referência

Temperatura de Referência: 20 °C.

Condição de funcionamento de referência:

Efectuar os ensaios se a temperatura ambiente for de (20 ± 1) °C e a variação da temperatura, for < 1 °C durante, no mínimo, 3 horas.

Modo operativo

- Método de medição de ângulos com a suta:

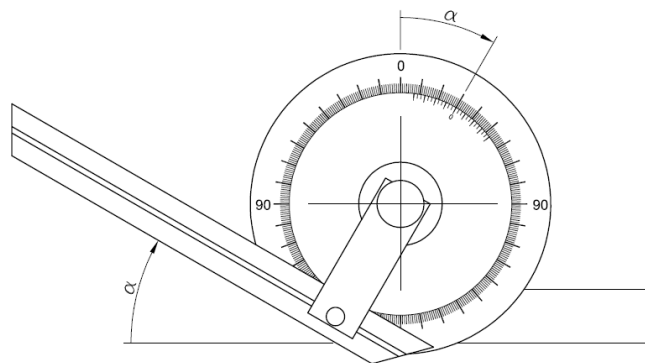


Figura 2 - Suta

A escala principal da suta está dividida em quatro quadrantes de 0° a 90° e com resolução de 1°. Com o nónio é possível medir frações angulares do grau.

Para se medir com a suta tem de se ter em conta o sentido da leitura e a posição inicial em que se realizar a medição. A sequência de medição pode ser realizada tanto para a esquerda como para a direita, e por esta razão a suta tem dois nónios, um à esquerda e outro à direita, do zero do nónio. Os graus inteiros lêem-se na escala principal que o traço zero do nónio aponta; o excesso do grau inteiro é obtido com o nónio correspondente ao sentido da leitura (figura 2) e para o traço do nónio que coincide com o traço da escala principal.

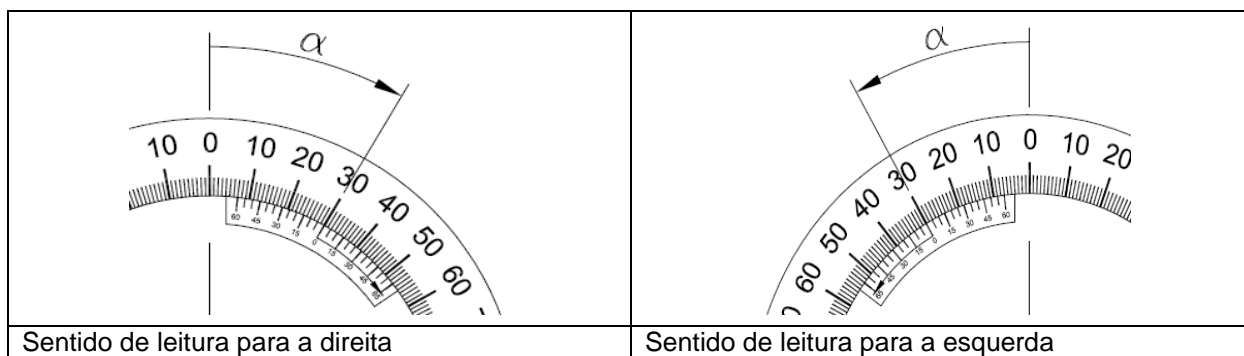


Figura 3 - Sentido de leitura na suta

O sentido de rotação da lâmina define o sentido de leitura da medição, relativamente à posição inicial.

O número de medições independentes a efetuar é de 5 para cada valor de referência a calibrar.

Os resultados de medição a apresentar, para a mensuranda em avaliação, é a média dos resultados obtidos nas 5 medições independentes.

Os valores nominais a medir são os apresentados nas tabelas seguintes, para cada quadrante:

Tabela 1 - 1º Quadrante

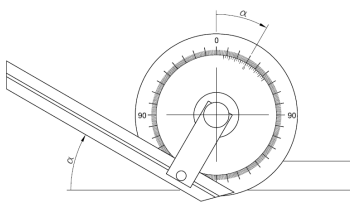

 		1º Quadrante	
Valor Nominal α	Valor de referência (utilizado pelo laboratório)	Indicação (na Suta) Valor medido	Erro de medição (VIM §2.16)
30° 10'			
45° 00'			
90° 00'			

Tabela 2 - 2º Quadrante

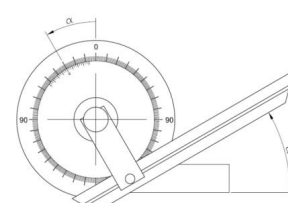
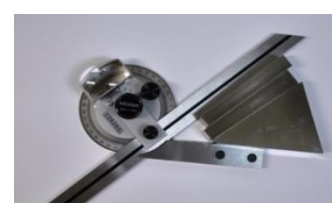
 		2º Quadrante	
Valor Nominal α	Valor de referência (utilizado pelo laboratório)	Indicação (na Suta) Valor medido	Erro de medição (VIM §2.16)
30° 00'			
30° 10'			
45° 00'			

Tabela 3 - 3º Quadrante

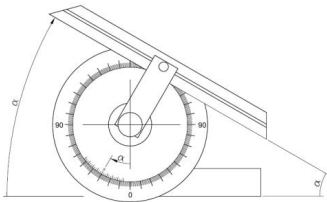
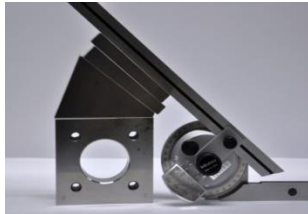
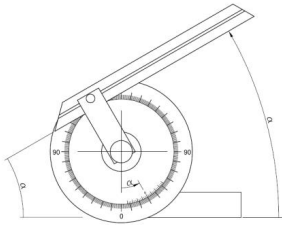
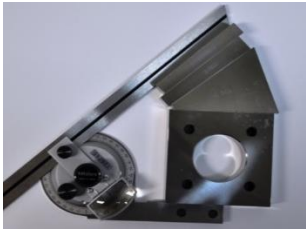
 		3º Quadrante	
Valor Nominal α	Valor de referência (utilizado pelo laboratório)	Indicação (na Suta) Valor medido	Erro de medição (VIM §2.16)
30° 00'			
41° 00'			

Tabela 4 - 4º Quadrante

 		4º Quadrante	
Valor Nominal α	Valor de referência (utilizado pelo laboratório)	Indicação (na Suta) Valor medido	Erro de medição (VIM §2.16)
15° 00'			
45° 00'			

Verificações

- Verificar se a suta está em bom estado de funcionamento;
- Verificar se o certificado de calibração dos blocos padrão angulares, está em vigor.

Método de registo das observações e dos resultados

Preencher as tabelas de 1 a 4 definidas na alínea 4.6.

Medidas de segurança a respeitar

- Usar luvas;
- Manusear com cuidado, os blocos padrão.

Critérios

Rejeitar o valor se o erro de medição for superior a duas vezes a resolução da suta.

Dados a registar

Os dados a registar são: os valores de referência, α , dos blocos padrão angulares utilizados e o valor indicado na suta quando a ler o ângulo formado pelos blocos, em cada quadrante e de acordo com os valores nominais definidos nas tabelas da alínea 4.6, para posterior cálculo do erro de medição, também a registar.

Balanço da incerteza

O quadro resumo das diversas fontes de incerteza é apresentado de seguida:

Tabela 5 – Resumo das Fontes de Incerteza

Grandeza (X_i)	Estimativa (x_i)	Incerteza-padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade (c_i)	Distribuição/ Avaliação	Graus de Liberdade (g_L)	Contribuição para a incerteza- padrão $u_i(y)$
Reprodutibilidade		u_1 (reprodu_ α)	1	Normal (Tipo A)		
Incerteza calibração dos Blocos Padrão		u_2 (incer_blocos)	1	Rectangular (Tipo B)		
Resolução da Suta		u_3 (res_suta)	1	Rectangular (Tipo B)		
					$u_c(y)$	

- a) Reprodutibilidade das medições efectuadas, $u_1(\text{reprodu})$

É obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média dos valores obtidos para o erro de medição, e :

$$u_1(\text{reprodu}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n(n-1)}}$$

Sendo, n : o número de medições, e_i : os valores individualmente obtidos e \bar{e} a média aritmética desses valores.

- b) Blocos Padrão Angulares, $u_2(\text{incer_blocos})$

$$u_2(\text{incer_blocos}) = \frac{U}{k}$$

- c) Resolução da Suta, $u_3(\text{res_suta})$

A Suta é um equipamento com resolução de R , pelo que a incerteza-padrão associada tem o valor de:

$$u_3(\text{res_suta}) = \sqrt{\frac{1}{3} \times R^2}$$

A incerteza-padrão combinada associada à grandeza α é dada por:

$$u_c(E) = \sqrt{(u_1(\text{reprodu}))^2 + (u_2(\text{incer_blocos}))^2 + (u_3(\text{res_suta}))^2}$$

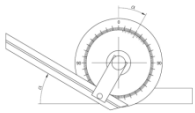
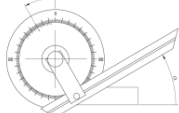
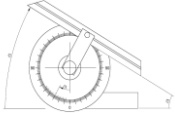
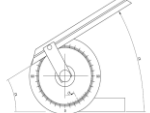
$$\text{Incerteza Expandida, } U = k \cdot u_c(E)$$

Apresentação dos Resultados

A informação final, a transmitir no Certificado de Calibração a emitir de acordo com o RLCM14, deverá apresentar um sumário do método aqui apresentado, bem como o resultado da medição de acordo com o exemplo da Tabela 5 e incerteza expandida de medição associada.

Nota: A apresentação dos resultados pode diferir deste exemplo em função do pedido do cliente ou das características da suta.

Tabela 6 – Resultados da Calibração da Suta

Valor nominal (ponto da escala)	Erro de indicação na Suta (em minutos)			
	1º Quadrante 	2º Quadrante 	3º Quadrante 	4º Quadrante 
15° 00'				
30° 00'				
30° 10'				
41° 00'				
45° 00'				
90° 00'				

Anexo E2: Certificado de Calibração de Sutas

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel (+351) 212 948 185
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.12 / 1340464

PÁGINA 1 de 2

ENTIDADE

NOME ACTF – Laboratório de Comprimento
ENDEREÇO Rua António Gião, 2; 2829-513 CAPARICA

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Suta
MARCA Mitutoyo
MODELO -----
NÚMERO 126265
CONSTITUIÇÃO Suta com régua de 300 mm

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO -----
INTERVALO DE INDICAÇÃO 0' a 90' (em 4 quadrantes)
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 5'

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração
DATA 2013-02-28
MÉTODO Comparação
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA BS 1685 e Protocolo de Medição ECI: Calibração de Suta
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI através dos blocos padrão angulares n/s 12161
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA $t = 20\text{ °C}$ (ISO 1)
INCERTEZA EXPANDIDA 7,8'
RESULTADO Ver página 2

CAPARICA, 5 de março de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).

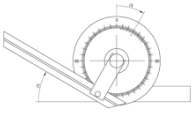
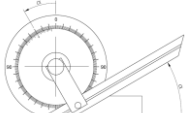
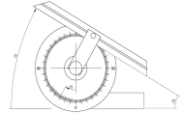
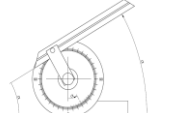


CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 110.12 / 1340464

PÁGINA 2 de 2

Resultados de medição:

Valor nominal (ponto da escala)	Indicação na Suta			
	1º Quadrante	2º Quadrante	3º Quadrante	4º Quadrante
15° 00'				
15° 00'	-----	-----	-----	14° 58' 20"
30° 00'	-----	29° 58' 34"	30° 00' 00"	-----
30° 10'	30° 13' 00"	30° 10' 00"	-----	-----
41° 00'	-----	-----	41° 00' 00"	-----
45° 00'	45° 00' 00"	45° 01' 00"	-----	44° 58' 20"
90° 00'	90° 00' 50"	-----	-----	-----

Notas:

1. A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza padrão multiplicada pelo factor de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005)".

2. A estabilidade a longo prazo do objecto não foi considerada.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

Anexo F1: Valores Obtidos na Medição nº3 na Calibração de Autocolimadores

V Nominal α	Down							Up							Média δ
	Mesa Rotativa			Autocolimador			δ	Mesa Rotativa			Autocolimador			δ	
	Média α_{REF}	Desvio Padrão	n_{REF}	Média α_{AC}	Desvio Padrão	n_{AC}		Média α_{REF}	Desvio Padrão	n_{REF}	Média α_{REF}	Desvio Padrão	n_{AC}		
149	148,9948	0,00273	20	149,0076	0,01588	20	0,01283	149,0265	0,00747	20	150,4075	0,03248	20	1,381	0,704455
148	147,9803	0,00176	20	147,9351	0,02122	20	-0,04519	148,0147	0,00222	20	149,4108	0,03321	20	1,39608	0,669425
147	146,9707	0,00222	20	146,9781	0,02077	20	0,00738	147,0064	0,00348	20	148,3904	0,02954	20	1,38404	0,68266
146	146,0347	0,00614	20	146,0099	0,03858	20	-0,02482	146,0389	0,00409	20	147,3968	0,01662	20	1,35794	0,65256
145	144,9961	0,00999	20	144,9237	0,01496	20	-0,07247	145,0363	0,00884	20	146,3662	0,03874	20	1,32994	0,6283
144	143,9926	0,00743	20	143,8612	0,02281	20	-0,13137	144,0209	0,00461	20	145,3499	0,02549	20	1,32907	0,569645
143	142,9785	0,00833	20	142,8169	0,04053	20	-0,1616	143,0123	0,00374	20	144,283	0,01941	20	1,27066	0,55415
142	141,9761	0,00981	20	141,794	0,0324	20	-0,18203	142,0047	0,008	20	143,2746	0,02868	20	1,2699	0,544915
141	140,9949	0,00258	20	140,8222	0,01494	20	-0,17265	141,0341	0,00409	20	142,306	0,02662	20	1,27186	0,56575
140	139,988	0,00273	20	139,8422	0,01923	20	-0,14583	140,0229	0,00306	20	141,3271	0,02098	20	1,30415	0,570675
139	138,9764	0,00273	20	138,8276	0,01954	20	-0,14878	139,0156	0,00218	20	140,3028	0,02936	20	1,28718	0,570465
138	137,9893	0,01104	20	137,8413	0,0189	20	-0,14801	138,0074	0,00245	20	139,2971	0,02356	20	1,28971	0,56265
137	137,0259	0,00402	20	136,84	0,02332	20	-0,1859	137,0354	0,00318	20	138,3088	0,01874	20	1,27331	0,50596
136	135,9943	0,00415	20	135,7706	0,03466	20	-0,22367	136,0289	0,00251	20	137,2267	0,0201	20	1,19782	0,487825
135	134,9818	0,00218	20	134,7411	0,01647	20	-0,24077	135,0173	0,01036	20	136,2166	0,0262	20	1,19932	0,45137
134	133,9747	0,00148	20	133,7231	0,02366	20	-0,25162	134,0105	0,00211	20	135,1541	0,01651	20	1,14351	0,44939
133	132,9655	0,00241	20	132,6914	0,02947	20	-0,27406	133,0029	0,00198	20	134,1533	0,01816	20	1,1504	0,45604
132	131,9944	0,00547	20	131,7587	0,02398	20	-0,23566	132,0313	0,00374	20	133,2174	0,02207	20	1,18614	0,492065
131	130,9869	0,00709	20	130,7883	0,0224	20	-0,19855	131,0242	0,0054	20	132,2439	0,01924	20	1,21979	0,51889
130	129,9787	0,00591	20	129,7959	0,0187	20	-0,18287	130,0192	0,00459	20	131,2555	0,02098	20	1,23633	0,567345
129	128,9741	0,00684	20	128,8573	0,01974	20	-0,11684	128,9939	0,01722	20	130,3115	0,02728	20	1,31756	0,59933
128	127,9989	0,00546	20	127,894	0,03096	20	-0,10485	128,0403	0,00782	20	129,3558	0,01202	20	1,3155	0,613145
127	126,992	0,00474	20	126,8957	0,04486	20	-0,09633	127,0264	0,00386	20	128,3575	0,0178	20	1,33114	0,604075
126	125,9815	0,00315	20	125,8796	0,01837	20	-0,10186	126,0205	0,00311	20	127,325	0,0197	20	1,30448	0,60517
125	124,9747	0,00461	20	124,8868	0,03399	20	-0,08792	125,0118	0,00429	20	126,324	0,02111	20	1,3122	0,62635
124	123,966	0,00234	20	123,8726	0,02477	20	-0,09335	124,0049	0,003	20	125,3455	0,01329	20	1,34062	0,624825
123	122,9965	0,00758	20	122,9137	0,02322	20	-0,08282	123,0318	0,00967	20	124,3748	0,02091	20	1,343	0,66128
122	121,9802	0,01014	20	121,9286	0,03013	20	-0,05169	122,0236	0,00319	20	123,429	0,02066	20	1,40538	0,693965
121	120,9769	0,00784	20	120,9739	0,02303	20	-0,00297	121,0133	0,00657	20	122,4529	0,02341	20	1,43962	0,740825
120	119,9693	0,00446	20	120,0012	0,03386	20	0,03187	120,0062	0,0059	20	121,4908	0,02272	20	1,48462	0,747495
119	118,9982	0,00184	20	119,0367	0,03314	20	0,03847	119,036	0,00297	20	120,4991	0,02899	20	1,46312	0,731975
118	117,99	0,00202	20	118,0223	0,03063	20	0,0323	118,0294	0,00273	20	119,4549	0,02794	20	1,42548	0,730205
117	116,9843	0,00876	20	117,0185	0,04737	20	0,03416	117,0185	0,00241	20	118,4467	0,04294	20	1,42811	0,714835

116	115,9735	0,00211	20	115,9838	0,03436	20	0,01034	116,0123	0,00268	20	117,4079	0,02647	20	1,39551	0,6925
115	114,9649	0,00237	20	114,9576	0,02884	20	-0,00727	115,007	0,00501	20	116,3817	0,0335	20	1,37466	0,678355
114	113,9949	0,0023	20	114,0116	0,03915	20	0,0167	114,0325	0,00264	20	115,3965	0,02394	20	1,36398	0,68786
113	112,9864	0,00231	20	112,9627	0,02157	20	-0,02366	113,024	0,00297	20	114,383	0,02522	20	1,35902	0,675355
112	111,9785	0,00315	20	111,9744	0,03698	20	-0,00414	112,0151	0,00237	20	113,3895	0,01711	20	1,37437	0,69261
111	110,966	0,00435	20	110,9382	0,0361	20	-0,02779	111,0083	0,00392	20	112,3977	0,02065	20	1,38936	0,668915
110	109,9944	0,00897	20	109,9296	0,03049	20	-0,0648	110,0441	0,00667	20	111,4097	0,02701	20	1,36562	0,649135
109	108,9846	0,00676	20	108,9129	0,02664	20	-0,07165	109,0271	0,00332	20	110,3901	0,02686	20	1,36307	0,633885
108	107,9822	0,00578	20	107,8735	0,03314	20	-0,10868	108,0218	0,00413	20	109,3612	0,03393	20	1,33942	0,614685
107	106,974	0,00691	20	106,8306	0,03181	20	-0,14335	107,0136	0,00452	20	108,3516	0,0393	20	1,33805	0,58869
106	105,9685	0,00793	20	105,8239	0,06702	20	-0,14462	106,0126	0,00715	20	107,3333	0,03362	20	1,32073	0,549505
105	104,9913	0,00348	20	104,821	0,02223	20	-0,17025	105,0316	0,00459	20	106,2752	0,02147	20	1,24363	0,53824
104	103,9846	0,00245	20	103,8622	0,02901	20	-0,12236	104,0227	0,00276	20	105,2695	0,02072	20	1,24673	0,57355
103	102,9778	0,00218	20	102,863	0,02517	20	-0,11482	103,0154	0,00271	20	104,2849	0,01875	20	1,26946	0,558
102	101,9698	0,00218	20	101,8228	0,04392	20	-0,14702	102,008	0,0036	20	103,2388	0,01868	20	1,23082	0,551815
101	100,9958	0,00339	20	100,8154	0,03834	20	-0,18039	101,0403	0,0068	20	102,2909	0,02184	20	1,25065	0,496395
100	100,0049	0,01227	20	99,79035	0,03529	20	-0,21459	100,0267	0,00188	20	101,1999	0,02731	20	1,17318	0,465835
99	99,00216	0,00685	20	98,7924	0,02197	20	-0,20976	99,01854	0,00176	20	100,1648	0,01721	20	1,14626	0,46205
98	97,97256	0,00245	20	97,71745	0,02279	20	-0,25511	98,01144	0,00633	20	99,1453	0,02414	20	1,13386	0,432015
97	96,96654	0,00241	20	96,7114	0,04933	20	-0,25514	97,00416	0,00271	20	98,1233	0,01526	20	1,11914	0,44485
96	95,99562	0,00655	20	95,7355	0,01526	20	-0,26012	96,03126	0,00456	20	97,1761	0,02113	20	1,14484	0,455
95	94,98492	0,00549	20	94,7839	0,02449	20	-0,20102	95,02308	0,00454	20	96,1932	0,02132	20	1,17012	0,51341
94	93,98052	0,0095	20	93,83005	0,03109	20	-0,15047	94,01526	0,00293	20	95,2431	0,02795	20	1,22784	0,551235
93	92,97864	0,01233	20	92,84385	0,04135	20	-0,13479	93,00816	0,00565	20	94,2611	0,02179	20	1,25294	0,562785
92	91,99692	0,00371	20	91,899	0,0347	20	-0,09792	92,04174	0,00575	20	93,3021	0,02519	20	1,26036	0,58455
91	90,98964	0,00386	20	90,9102	0,02265	20	-0,07944	91,02798	0,00297	20	92,295	0,03552	20	1,26702	0,596665
90	89,9829	0,0023	20	89,9059	0,03438	20	-0,077	90,02088	0,00362	20	91,29365	0,02124	20	1,27277	0,58561
89	88,97202	0,0034	20	88,873	0,03924	20	-0,09902	89,01108	0,00352	20	90,2593	0,03325	20	1,24822	0,57876
88	87,96438	0,0036	20	87,88805	0,03676	20	-0,07633	88,00596	0,00284	20	89,2625	0,02156	20	1,25654	0,5982
87	86,99112	0,00744	20	86,951	0,02742	20	-0,04012	87,03162	0,00488	20	88,30435	0,03198	20	1,27273	0,629525
86	85,98744	0,00589	20	85,95915	0,03708	20	-0,02829	86,02398	0,0036	20	87,32315	0,02207	20	1,29917	0,646915
85	84,97854	0,00621	20	84,9598	0,05321	20	-0,01874	85,01508	0,00371	20	86,3372	0,02292	20	1,32212	0,66564
84	83,97774	0,01333	20	83,98095	0,03858	20	0,00321	84,00438	0,00429	20	85,3544	0,02689	20	1,35002	0,676745
83	82,99638	0,00247	20	83,0064	0,02505	20	0,01002	83,03562	0,00378	20	84,3859	0,02335	20	1,35028	0,67356
82	81,99	0,00165	20	82,01685	0,03113	20	0,02685	82,017	0,01022	20	83,3541	0,03543	20	1,3371	0,68176
81	80,98182	0,00184	20	80,99155	0,0346	20	0,00973	81,02178	0,00885	20	82,35845	0,02709	20	1,33667	0,65914
80	79,97382	0,00444	20	79,9499	0,01921	20	-0,02392	80,0118	0,00298	20	81,32035	0,03916	20	1,30855	0,642225
79	78,96474	0,00241	20	78,9618	0,03109	20	-0,00294	79,00308	0,00237	20	80,31145	0,01713	20	1,30837	0,6471
78	77,99256	0,00318	20	77,93515	0,05279	20	-0,05741	78,03216	0,00428	20	79,3293	0,02791	20	1,29714	0,60376
77	76,98654	0,00211	20	76,9689	0,02934	20	-0,01764	77,02632	0,0049	20	78,29125	0,02202	20	1,26493	0,61713
76	75,97908	0,00237	20	75,92325	0,03094	20	-0,05583	76,0149	0,00328	20	77,2668	0,02564	20	1,2519	0,594895
75	74,96766	0,00268	20	74,90285	0,0217	20	-0,06481	74,99628	0,03239	20	76,2419	0,05696	20	1,24562	0,583325
74	74,00808	0,01552	20	73,9375	0,02366	20	-0,07058	74,03544	0,00358	20	75,2669	0,0169	20	1,23146	0,553885
73	72,9972	0,00927	20	72,93875	0,03405	20	-0,05845	73,0278	0,0032	20	74,20615	0,01581	20	1,17835	0,54976
72	71,98236	0,00983	20	71,82685	0,02241	20	-0,15551	72,01998	0,00541	20	73,17795	0,02672	20	1,15797	0,492825

71	70,97598	0,00715	20	70,82785	0,0375	20	-0,14813	71,01594	0,00632	20	72,1571	0,02436	20	1,14116	0,488835
70	69,96852	0,00702	20	69,78305	0,03998	20	-0,18547	70,0047	0,00328	20	71,1305	0,02539	20	1,1258	0,468465
69	68,99382	0,00218	20	68,79125	0,04088	20	-0,20257	69,0309	0,00283	20	70,1533	0,02646	20	1,1224	0,45768
68	67,9995	0,01179	20	67,86245	0,04832	20	-0,13705	68,02272	0,00461	20	69,14065	0,02906	20	1,11793	0,499555
67	66,9771	0,00419	20	66,84245	0,02917	20	-0,13465	67,01544	0,00245	20	68,1516	0,01999	20	1,13616	0,492565
66	65,97036	0,00348	20	65,8127	0,03988	20	-0,15766	66,00762	0,00273	20	67,1274	0,02984	20	1,11978	0,46552
65	64,9971	0,00198	20	64,80495	0,03605	20	-0,19215	65,0376	0,00748	20	66,1263	0,03275	20	1,0887	0,426705
64	63,99036	0,00111	20	63,84835	0,04259	20	-0,14201	64,03104	0,00654	20	65,0766	0,03168	20	1,04556	0,43142
63	62,9793	0,00402	20	62,77595	0,04224	20	-0,20335	63,0171	0,0069	20	64,02195	0,01841	20	1,00485	0,38295
62	61,97292	0,00237	20	61,7604	0,04009	20	-0,21252	62,0109	0,00198	20	62,98015	0,0214	20	0,96925	0,38372
61	60,96582	0,00142	20	60,72955	0,04197	20	-0,23627	61,00524	0,00559	20	61,9852	0,01951	20	0,97996	0,382985
60	59,99328	0,00504	20	59,7907	0,03547	20	-0,20258	60,03036	0,00451	20	61,0326	0,03062	20	1,00224	0,40569
59	58,98618	0,00686	20	58,8258	0,03748	20	-0,16038	59,02344	0,00339	20	60,0374	0,02716	20	1,01396	0,439545
58	57,97818	0,00923	20	57,84625	0,03132	20	-0,13193	58,01238	0,00743	20	59,05185	0,01857	20	1,03947	0,46849
57	56,97306	0,01	20	56,89205	0,0251	20	-0,08101	57,00924	0,00791	20	58,07815	0,02058	20	1,06891	0,502515
56	55,99818	0,00297	20	55,91315	0,02758	20	-0,08503	56,03346	0,00526	20	57,1195	0,0211	20	1,08604	0,494715
55	54,99126	0,00293	20	54,9469	0,0278	20	-0,04436	55,02744	0,00733	20	56,1019	0,01941	20	1,07446	0,51959
54	53,9829	0,00258	20	53,9268	0,02779	20	-0,0561	54,02016	0,00394	20	55,1037	0,01754	20	1,08354	0,50108
53	52,97364	0,00284	20	52,91145	0,04588	20	-0,06219	53,01054	0,00575	20	54,0688	0,01998	20	1,05826	0,50032
52	51,96564	0,00307	20	51,89745	0,04576	20	-0,06819	52,00812	0,00875	20	53,07095	0,02396	20	1,06283	0,495095
51	50,99058	0,00854	20	50,9328	0,02437	20	-0,05778	51,03072	0,00555	20	52,0891	0,02079	20	1,05838	0,51501
50	49,97988	0,00758	20	49,95935	0,03944	20	-0,02053	50,0265	0,00546	20	51,1143	0,01665	20	1,0878	0,548925
49	48,97566	0,00456	20	49,0038	0,03984	20	0,02814	49,01832	0,00362	20	50,1367	0,02543	20	1,11838	0,57281
48	47,97054	0,00409	20	48,01005	0,06559	20	0,03951	48,00492	0,0073	20	49,1224	0,01411	20	1,11748	0,60135
47	46,998	0,00234	20	47,0548	0,02125	20	0,0568	47,03436	0,00348	20	48,19755	0,03362	20	1,16319	0,59847
46	45,99144	0,00796	20	46,03855	0,02917	20	0,04711	46,02906	0,00972	20	47,1692	0,02099	20	1,14014	0,587525
45	44,98632	0,00635	20	45,0173	0,05595	20	0,03098	45,02106	0,00632	20	46,149	0,0349	20	1,12794	0,5575
44	43,97202	0,00413	20	44,006	0,03003	20	0,03398	44,01288	0,0038	20	45,0969	0,02325	20	1,08402	0,554305
43	42,96582	0,00184	20	42,9662	0,05397	20	0,00038	43,00092	0,00561	20	44,07555	0,03081	20	1,07463	0,531895
42	41,994	0,00234	20	42,0154	0,03355	20	0,0214	42,03144	0,00295	20	43,09485	0,02977	20	1,06341	0,535275
41	40,98636	0,00231	20	40,95635	0,03069	20	-0,03001	41,0256	0,00809	20	42,07475	0,02842	20	1,04915	0,518185
40	39,97728	0,00251	20	39,99965	0,02606	20	0,02237	40,01562	0,00247	20	41,082	0,02324	20	1,06638	0,535325
39	38,96784	0,00318	20	39,0065	0,0335	20	0,03866	39,00942	0,00247	20	40,0577	0,02881	20	1,04828	0,53104
38	38,00934	0,01465	20	37,98895	0,02704	20	-0,02039	38,03418	0,00429	20	39,0576	0,02432	20	1,02342	0,48367
37	36,99486	0,00993	20	36,94315	0,03889	20	-0,05171	37,02852	0,00497	20	38,01625	0,02631	20	0,98773	0,44129
36	35,9874	0,00878	20	35,90805	0,04349	20	-0,07935	36,01926	0,00513	20	36,95355	0,02052	20	0,93429	0,416335
35	34,97778	0,00752	20	34,8354	0,03043	20	-0,14238	35,01198	0,00474	20	35,924	0,02369	20	0,91202	0,3802
34	33,96708	0,00585	20	33,8597	0,03508	20	-0,10738	33,99822	0,01211	20	34,901	0,02146	20	0,90278	0,39989
33	32,99436	0,00328	20	32,84755	0,03579	20	-0,14681	33,03144	0,00318	20	33,9386	0,02933	20	0,90716	0,381945
32	31,995	0,01171	20	31,87175	0,0485	20	-0,12325	32,0238	0,00219	20	32,9345	0,02655	20	0,9107	0,40421
31	30,9744	0,0035	20	30,84225	0,01967	20	-0,13215	31,01598	0,00273	20	31,94765	0,01818	20	0,93167	0,378355
30	29,97	0,00202	20	29,85535	0,04167	20	-0,11465	30,00744	0,00318	20	30,8963	0,02127	20	0,88886	0,397675
29	28,99836	0,00231	20	28,8663	0,03287	20	-0,13206	29,0358	0,0036	20	29,9458	0,0229	20	0,91	0,3587
28	27,98964	0,00199	20	27,816	0,03269	20	-0,17364	28,02924	0,00808	20	28,8787	0,03099	20	0,84946	0,320385
27	26,98344	0,00813	20	26,77385	0,02053	20	-0,20959	27,02034	0,00211	20	27,83475	0,02747	20	0,81441	0,283065

26	25,97508	0,00288	20	25,75885	0,02445	20	-0,21623	26,01108	0,00206	20	26,7868	0,02157	20	0,77572	0,2909
25	24,96492	0,00237	20	24,742	0,05012	20	-0,22292	25,00272	0,00148	20	25,80075	0,02349	20	0,79803	0,284425
24	23,99238	0,00578	20	23,8158	0,03524	20	-0,17658	24,03198	0,00218	20	24,82375	0,01862	20	0,79177	0,33155
23	22,98708	0,00597	20	22,82955	0,03948	20	-0,15753	23,01912	0,00879	20	23,8588	0,01955	20	0,83968	0,358745
22	21,97926	0,00621	20	21,85275	0,02893	20	-0,12651	22,01598	0,00429	20	22,891	0,03452	20	0,87502	0,38855
21	20,9673	0,00638	20	20,89415	0,03206	20	-0,07315	21,00744	0,00611	20	21,91105	0,01716	20	0,90361	0,434075
20	19,99728	0,00222	20	19,95415	0,04094	20	-0,04313	20,0358	0,0032	20	20,9771	0,02408	20	0,9413	0,443185
19	18,98874	0,00268	20	18,93475	0,04726	20	-0,05399	19,0278	0,00298	20	19,9573	0,02211	20	0,9295	0,43806
18	17,97606	0,00551	20	17,91925	0,03038	20	-0,05681	18,01944	0,00245	20	18,94955	0,02339	20	0,93011	0,432655
17	16,97274	0,00315	20	16,9132	0,02417	20	-0,05954	17,00658	0,00488	20	17,9287	0,02124	20	0,92212	0,42731
16	15,96546	0,00268	20	15,95345	0,03395	20	-0,01201	16,00434	0,00356	20	16,9185	0,01631	20	0,91416	0,466745
15	14,98662	0,00987	20	14,95315	0,03582	20	-0,03347	15,0309	0,00367	20	15,9764	0,02617	20	0,9455	0,46809
14	13,99284	0,01252	20	13,9918	0,03659	20	-0,00104	14,022	0,00387	20	14,99165	0,028	20	0,96965	0,484235
13	12,99546	0,01091	20	13,0451	0,05246	20	0,04964	13,01634	0,00575	20	13,98585	0,02236	20	0,96951	0,53823
12	11,97198	0,00686	20	12,0017	0,03113	20	0,02972	12,00618	0,00273	20	13,033	0,03491	20	1,02682	0,51985
11	10,99746	0,00315	20	11,0867	0,04657	20	0,08924	11,03112	0,00839	20	12,0411	0,01928	20	1,00998	0,540475
10	9,9909	0,0016	20	10,0804	0,03351	20	0,0895	10,02564	0,00259	20	11,01735	0,02791	20	0,99171	0,53017
9	8,98164	0,00161	20	9,0132	0,03404	20	0,03156	8,98056	0,00589	20	9,9514	0,02706	20	0,97084	0,502325
8	7,97418	0,00218	20	7,96625	0,0299	20	-0,00793	7,71336	0,08455	20	8,68645	0,09227	20	0,97309	0,453785
7	6,96546	0,00176	20	7,0041	0,04222	20	0,03864	7,002	0,00202	20	7,9175	0,02348	20	0,9155	0,48582
6	5,9922	0,0032	20	5,98445	0,03723	20	-0,00775	5,9715	0,0347	20	6,9045	0,02021	20	0,933	0,463975
5	4,99554	0,00828	20	5,00725	0,01931	20	0,01171	5,0229	0,00283	20	5,9586	0,02813	20	0,9357	0,46669
4	3,97584	0,00411	20	3,96365	0,04173	20	-0,01219	4,01508	0,00389	20	4,93675	0,02225	20	0,92167	0,447985
3	2,96946	0,00241	20	2,9314	0,06035	20	-0,03806	3,00654	0,00336	20	3,9147	0,01316	20	0,90816	0,420555
2	1,9962	0,00489	20	1,963	0,03333	20	-0,0332	2,03508	0,00549	20	2,91425	0,02725	20	0,87917	0,407995
1	0,99198	0,00686	20	0,91755	0,04049	20	-0,07443	0,98046	0,01913	20	1,82965	0,02923	20	0,84919	0,37484
0	-0,01746	0,00587	20	-0,1151	0,0206	20	-0,09764	0,01854	0,00499	20	0,84265	0,03217	20	0,82411	0,335605
-1	-1,02636	0,0068	20	-1,1274	0,02483	20	-0,10104	-0,9882	0,00429	20	-0,21935	0,02973	20	0,76885	0,32496
-2	-2,0376	0,00729	20	-2,1596	0,03387	20	-0,122	-2,01906	0,00922	20	-1,2681	0,01687	20	0,75096	0,31614
-3	-3,00636	0,00328	20	-3,14375	0,02876	20	-0,13739	-2,96928	0,0038	20	-2,215	0,01599	20	0,75428	0,323175
-4	-4,01544	0,00318	20	-4,14685	0,04107	20	-0,13141	-4,01094	0,0086	20	-3,2272	0,03265	20	0,78374	0,3351213
-5	-5,022	0,00234	20	-5,11765	0,0422	20	-0,09565	-5,04265	0,04511	19	-4,241	0,0395	19	0,80165	0,288675
-6	-6,03126	0,00176	20	-6,1587	0,02921	20	-0,12744	-5,364	NaN	1	-4,691	NaN	1	0,673	0,31739
-7	-7,00182	0,00218	20	-7,111	0,03785	20	-0,10918	-5,99382	0,00218	20	-5,2316	0,01862	20	0,76222	0,31637
-8	-8,00784	0,00837	20	-8,2163	0,02856	20	-0,20846	-6,96582	0,00218	20	-6,2239	0,02399	20	0,74192	0,247905
-9	-9,0189	0,00283	20	-9,20705	0,03109	20	-0,18815	-7,97292	0,00497	20	-7,26865	0,01809	20	0,70427	0,24998
-10	-10,0271	0,00288	20	-10,2287	0,0337	20	-0,20157	-8,98506	0,00471	20	-8,29695	0,02998	20	0,68811	0,225955
-11	-11,0338	0,00184	20	-11,252	0,01944	20	-0,21818	-10,0361	0,02924	20	-9,3826	0,04151	20	0,65348	0,21855
-12	-12,0062	0,0036	20	-12,2064	0,02914	20	-0,20017	-11,0864	0,11292	20	-10,4311	0,13145	20	0,65528	0,236295
-13	-13,0135	0,00356	20	-13,1878	0,04099	20	-0,17434	-12,0523	0,04137	20	-11,3795	0,05969	20	0,67276	0,260595
-14	-14,0269	0,0061	20	-14,1317	0,02219	20	-0,10484	-13,0385	0,02196	20	-12,343	0,03855	20	0,69553	0,31095
-15	-15,0187	0,01243	20	-15,0933	0,0479	20	-0,07464	-13,9883	0,00563	20	-13,2616	0,01765	20	0,72674	0,340475
-16	-16,0024	0,00386	20	-16,1	0,06001	20	-0,09759	-14,999	0,00622	20	-14,2435	0,03146	20	0,75559	0,34579
-17	-17,0114	0,00339	20	-17,0867	0,03048	20	-0,07526	-16,0045	0,00913	20	-15,2154	0,01852	20	0,78917	0,352445
-18	-18,0187	0,00251	20	-18,0838	0,01901	20	-0,06503	-16,9758	0,00554	20	-16,1957	0,0247	20	0,78015	0,356595

-19	-19,026	0,0033	20	-19,089	0,02458	20	-0,063	-17,9818	0,00297	20	-17,2036	0,02367	20	0,77822	0,34918
-20	-20,0345	0,00293	20	-20,1136	0,0222	20	-0,07901	-19,0192	0,0097	20	-18,2578	0,02741	20	0,76136	0,339645
-21	-21,0046	0,01364	20	-21,0879	0,01579	20	-0,08334	-19,9971	0,00283	20	-19,2388	0,01789	20	0,7583	0,35241
-22	-22,0176	0,00421	20	-22,057	0,02463	20	-0,03935	-20,9704	0,00547	20	-20,1822	0,02563	20	0,78816	0,3694
-23	-23,0231	0,00406	20	-23,0154	0,02641	20	0,00773	-22,0068	0,01253	20	-21,2287	0,02844	20	0,77815	0,42237
-24	-24,0314	0,00553	20	-24,0046	0,01418	20	0,02689	-22,9855	0,00315	20	-22,1485	0,02839	20	0,83701	0,428005
-25	-25,0024	0,00231	20	-24,9373	0,02239	20	0,06506	-23,9929	0,00288	20	-23,1638	0,01938	20	0,82912	0,458325
-26	-26,0098	0,00218	20	-25,9624	0,01971	20	0,04742	-24,9665	0,00211	20	-24,115	0,02112	20	0,85159	0,439135
-27	-27,0182	0,00218	20	-26,9699	0,01896	20	0,04828	-25,9884	0,00866	20	-25,1576	0,01857	20	0,83085	0,425945
-28	-28,0247	0,00868	20	-27,9884	0,02759	20	0,03634	-27,0112	0,0099	20	-26,2076	0,02022	20	0,80361	0,4205
-29	-29,0344	0,00231	20	-29,0369	0,0259	20	-0,00254	-27,9886	0,00215	20	-27,1839	0,02109	20	0,80466	0,39052
-30	-30,0069	0,00402	20	-29,9848	0,0198	20	0,0221	-28,9982	0,00184	20	-28,2146	0,02691	20	0,78358	0,39841
-31	-31,0138	0,00247	20	-31,0245	0,01633	20	-0,01068	-29,9689	0,00206	20	-29,1942	0,02879	20	0,77472	0,380375
-32	-32,0229	0,0016	20	-32,0136	0,01902	20	0,00935	-30,9773	0,0038	20	-30,2059	0,0254	20	0,77143	0,388835
-33	-33,03	0,00234	20	-33,0491	0,0118	20	-0,01905	-31,9858	0,00396	20	-31,2175	0,022	20	0,76832	0,363285
-34	-34,0103	0,00784	20	-34,0301	0,0333	20	-0,01977	-32,9965	0,00454	20	-32,2509	0,02887	20	0,74562	0,35118
-35	-35,0145	0,0045	20	-35,1279	0,01963	20	-0,11335	-33,9635	0,00749	20	-33,2414	0,0178	20	0,72213	0,284825
-36	-36,018	0,0071	20	-36,1651	0,02914	20	-0,14705	-34,9767	0,00747	20	-34,2937	0,02518	20	0,683	0,250135
-37	-37,0269	0,01336	20	-37,1705	0,01567	20	-0,14355	-35,9827	0,0038	20	-35,3354	0,01304	20	0,64732	0,24315
-38	-38,0309	0,00723	20	-38,2047	0,02415	20	-0,17376	-36,9882	0,00725	20	-36,3584	0,02665	20	0,62985	0,21676
-39	-39,0076	0,0034	20	-39,1723	0,03589	20	-0,16468	-37,9991	0,0063	20	-37,3918	0,02071	20	0,60728	0,22177
-40	-40,0156	0,00459	20	-40,1902	0,02228	20	-0,17458	-38,968	0,0034	20	-38,3598	0,0242	20	0,60822	0,211205
-41	-41,0227	0,00398	20	-41,1869	0,02634	20	-0,16413	-39,9767	0,00268	20	-39,3798	0,02085	20	0,59699	0,20955
-42	-42,0298	0,00247	20	-42,1733	0,01861	20	-0,14343	-40,9853	0,00251	20	-40,4021	0,01943	20	0,58323	0,22769
-43	-43,0024	0,00231	20	-43,1711	0,02703	20	-0,16874	-41,9926	0,00271	20	-41,3938	0,02421	20	0,59881	0,210555
-44	-44,0082	0,00916	20	-44,2282	0,01385	20	-0,21995	-42,9651	0,00328	20	-42,3753	0,0228	20	0,58985	0,16148
-45	-45,0209	0,00398	20	-45,2531	0,01987	20	-0,23217	-43,9735	0,00241	20	-43,4306	0,02287	20	0,54291	0,135655
-46	-46,0276	0,00319	20	-46,2912	0,00581	20	-0,26358	-44,9804	0,00273	20	-44,4769	0,02466	20	0,50348	0,105305
-47	-47,0342	0,00184	20	-47,2909	0,01818	20	-0,25667	-45,9896	0,00368	20	-45,5155	0,02585	20	0,47419	0,115185
-48	-48,0037	0,01	20	-48,2333	0,02124	20	-0,22964	-46,9976	0,00231	20	-46,5106	0,01917	20	0,48704	0,134125
-49	-49,0151	0,00469	20	-49,1874	0,0175	20	-0,17232	-47,9768	0,00808	20	-47,479	0,01607	20	0,49789	0,17696
-50	-50,0236	0,00623	20	-50,1727	0,01114	20	-0,14903	-48,9776	0,00368	20	-48,4514	0,02323	20	0,52624	0,216865
-51	-51,03	0,00607	20	-51,1635	0,02469	20	-0,1335	-49,9864	0,00307	20	-49,4036	0,03087	20	0,58276	0,23802
-52	-52,0029	0,00367	20	-52,0749	0,0193	20	-0,07195	-50,9918	0,00622	20	-50,3823	0,02372	20	0,60954	0,270435
-53	-53,0089	0,00352	20	-53,0733	0,02261	20	-0,06438	-51,9658	0,00319	20	-51,353	0,0361	20	0,61282	0,28653
-54	-54,0221	0,00315	20	-54,0903	0,01359	20	-0,06816	-52,9736	0,00328	20	-52,3362	0,02516	20	0,63744	0,285705
-55	-55,0282	0,00215	20	-55,0911	0,01827	20	-0,06294	-53,9827	0,00579	20	-53,3432	0,0246	20	0,63957	0,27965
-56	-56,0347	0,003	20	-56,1275	0,0233	20	-0,09273	-54,9896	0,00348	20	-54,3674	0,01487	20	0,62224	0,264725
-57	-57,0058	0,00474	20	-57,0798	0,01187	20	-0,07398	-55,9973	0,00322	20	-55,3751	0,02161	20	0,62218	0,280045
-58	-58,023	0,00686	20	-58,0198	0,01507	20	0,0032	-56,9698	0,00378	20	-56,3358	0,02354	20	0,63407	0,33486
-59	-59,0224	0,00466	20	-58,9908	0,01411	20	0,03161	-57,9778	0,00396	20	-57,3113	0,03655	20	0,66652	0,36096
-60	-60,0309	0,00402	20	-59,9852	0,03282	20	0,04575	-59,0026	0,00742	20	-58,3123	0,02358	20	0,69031	0,37096
-61	-61,0029	0,0023	20	-60,953	0,02279	20	0,0499	-59,9938	0,00273	20	-59,2977	0,0148	20	0,69617	0,384035
-62	-62,0114	0,00215	20	-61,9627	0,0197	20	0,04879	-60,9658	0,00218	20	-60,2477	0,01169	20	0,71817	0,3802
-63	-63,0193	0,00268	20	-62,9792	0,01266	20	0,04006	-61,9726	0,00411	20	-61,261	0,01823	20	0,71161	0,35821

-64	-64,0264	0,00728	20	-64,0286	0,019	20	-0,00224	-62,9815	0,00241	20	-62,3051	0,01978	20	0,67636	0,32061
-65	-65,0336	0,00368	20	-65,072	0,01771	20	-0,03836	-63,9904	0,00199	20	-63,3469	0,02855	20	0,64346	0,303585
-66	-66,0065	0,00211	20	-66,0007	0,02161	20	0,00584	-64,9964	0,00319	20	-64,3509	0,01337	20	0,64553	0,30994
-67	-67,0149	0,00258	20	-67,0354	0,01084	20	-0,02045	-65,9687	0,00176	20	-65,3547	0,01891	20	0,61404	0,29556
-68	-68,0184	0,00956	20	-68,0393	0,00978	20	-0,02085	-66,9778	0,00218	20	-66,3663	0,01482	20	0,61157	0,30567
-69	-69,0329	0,00251	20	-69,0331	0,01966	20	-0,00017	-67,9847	0,00336	20	-67,3526	0,02028	20	0,63219	0,302755
-70	-70,0033	0,00723	20	-70,0345	0,02007	20	-0,03119	-68,9942	0,0034	20	-68,3885	0,02825	20	0,60568	0,282875
-71	-71,01	0,00522	20	-71,0873	0,02075	20	-0,07725	-69,9674	0,00644	20	-69,3705	0,02055	20	0,59694	0,241445
-72	-72,0173	0,00667	20	-72,0663	0,01171	20	-0,04897	-70,9718	0,00501	20	-70,4117	0,02869	20	0,56014	0,236815
-73	-73,0273	0,00485	20	-73,1242	0,01667	20	-0,09694	-71,9811	0,00546	20	-71,4585	0,01787	20	0,5226	0,198805
-74	-74,0309	0,01007	20	-74,1529	0,0209	20	-0,12196	-72,9909	0,00606	20	-72,4964	0,03303	20	0,49455	0,176355
-75	-75,008	0,00297	20	-75,1771	0,02873	20	-0,16912	-73,996	0,00578	20	-73,5214	0,03015	20	0,47467	0,14532
-76	-76,0153	0,00268	20	-76,1175	0,01152	20	-0,10219	-74,9695	0,00293	20	-74,5097	0,02338	20	0,45976	0,184135
-77	-77,0231	0,00169	20	-77,1284	0,0172	20	-0,10527	-75,9784	0,00284	20	-75,5079	0,01888	20	0,47046	0,187625
-78	-78,0298	0,00297	20	-78,1112	0,02428	20	-0,08138	-76,9858	0,00429	20	-76,5053	0,01871	20	0,48052	0,19521
-79	-79,0043	0,00336	20	-79,0999	0,0118	20	-0,09551	-77,994	0,00202	20	-77,5222	0,03655	20	0,4718	0,18066
-80	-80,0131	0,00293	20	-80,1636	0,01333	20	-0,15054	-78,9662	0,00247	20	-78,5094	0,03363	20	0,45683	0,13668
-81	-81,0189	0,0016	20	-81,1666	0,01563	20	-0,1477	-79,974	0,00202	20	-79,5501	0,0167	20	0,4239	0,114745
-82	-82,028	0,00184	20	-82,2162	0,01185	20	-0,18822	-80,9816	0,00199	20	-80,6045	0,03618	20	0,37719	0,081935
-83	-83,0338	0,00184	20	-83,2217	0,01262	20	-0,18788	-81,9896	0,00199	20	-81,6376	0,01814	20	0,35209	0,076925
-84	-84,0064	0,00284	20	-84,1665	0,02899	20	-0,16014	-82,9982	0,00218	20	-82,6565	0,02279	20	0,34173	0,097965
-85	-85,019	0,00428	20	-85,1567	0,0192	20	-0,13761	-84,0031	0,00343	20	-83,6471	0,02158	20	0,35607	0,12687
-86	-86,0152	0,01063	20	-86,0886	0,02095	20	-0,07344	-84,978	0,00387	20	-84,5867	0,03427	20	0,39135	0,17183
-87	-87,0329	0,00726	20	-87,0731	0,01142	20	-0,04017	-85,9869	0,00507	20	-85,5698	0,02319	20	0,4171	0,21597
-88	-88,0015	0,00426	20	-88,0182	0,02515	20	-0,01674	-86,9998	0,00665	20	-86,5277	0,02567	20	0,47211	0,22979
-89	-89,0111	0,00264	20	-89,0466	0,01631	20	-0,03552	-87,9667	0,00322	20	-87,4904	0,02768	20	0,47632	0,21676
-90	-90,0122	0,01092	20	-90,0036	0,02393	20	0,00869	-89,0042	0,00377	20	-88,5352	0,02678	20	0,46904	0,24571
-91	-91,0285	0,00406	20	-91,0376	0,02329	20	-0,00908	-89,9822	0,0034	20	-89,4995	0,02032	20	0,48273	0,24024
-92	-92,036	0,00378	20	-92,0173	0,03328	20	0,01868	-90,9913	0,00356	20	-90,5017	0,02513	20	0,48956	0,24648
-93	-93,0055	0,00456	20	-92,956	0,01911	20	0,04951	-91,9982	0,00247	20	-91,5239	0,02922	20	0,47428	0,273425
-94	-94,014	0,00482	20	-93,9467	0,01195	20	0,06735	-92,9714	0,00553	20	-92,4741	0,02682	20	0,49734	0,288425
-95	-95,0231	0,00389	20	-94,8907	0,02614	20	0,13238	-93,978	0,00286	20	-93,4685	0,02004	20	0,5095	0,335535
-96	-96,0287	0,00643	20	-95,9125	0,01773	20	0,11624	-94,9883	0,00485	20	-94,4497	0,03695	20	0,53869	0,336325
-97	-97,0043	0,00268	20	-96,8605	0,01398	20	0,14384	-96,0115	0,00392	20	-95,4551	0,01971	20	0,55641	0,348315
-98	-98,012	0,0034	20	-97,8612	0,018	20	0,15083	-96,9683	0,00356	20	-96,4156	0,02383	20	0,55279	0,35734
-99	-99,0194	0,00215	20	-98,9075	0,02311	20	0,11199	-97,974	0,00202	20	-97,4102	0,01608	20	0,56385	0,34146
-100	-100,026	0,00234	20	-99,8775	0,01764	20	0,14855	-98,9822	0,00273	20	-98,4113	0,02093	20	0,57093	0,34611
-101	-101,036	0,00176	20	-100,945	0,01885	20	0,09169	-99,9889	0,00237	20	-99,4453	0,02515	20	0,54367	0,30357
-102	-102,009	0,00471	20	-101,89	0,01382	20	0,11906	-100,999	0,00198	20	-100,484	0,02759	20	0,51545	0,316085
-103	-103,016	0,00378	20	-102,889	0,02538	20	0,1266	-101,97	0,00231	20	-101,457	0,01788	20	0,51311	0,311615
-104	-104,021	0,00343	20	-103,928	0,00933	20	0,09378	-102,996	0,00218	20	-102,5	0,03032	20	0,49663	0,29241
-105	-105,031	0,00215	20	-104,912	0,02208	20	0,11904	-103,987	0,00241	20	-103,496	0,02019	20	0,49104	0,29653
-106	-106,005	0,00524	20	-105,9	0,02711	20	0,10432	-104,995	0,00222	20	-104,521	0,02253	20	0,47402	0,29357
-107	-107,006	0,01295	20	-106,94	0,0253	20	0,06579	-105,968	0,00578	20	-105,485	0,02463	20	0,48282	0,261705
-108	-108,023	0,00644	20	-107,985	0,0192	20	0,03804	-106,975	0,00446	20	-106,517	0,02791	20	0,45762	0,206695

-109	-109,026	0,00634	20	-109,027	0,01859	20	-0,00128	-108,019	0,00865	20	-107,644	0,02891	20	0,37535	0,17292
-110	-110,035	0,00454	20	-110,034	0,03242	20	0,00108	-108,99	0,00612	20	-108,643	0,02395	20	0,34712	0,172345
-111	-111,006	0,00293	20	-110,983	0,02909	20	0,02271	-109,999	0,00587	20	-109,656	0,02344	20	0,34361	0,17489
-112	-112,015	0,00264	20	-111,989	0,01651	20	0,02633	-110,97	0,00218	20	-110,643	0,02913	20	0,32707	0,17632
-113	-113,017	0,01054	20	-112,961	0,01042	20	0,05576	-111,978	0,00231	20	-111,652	0,01517	20	0,32631	0,19551
-114	-114,032	0,00297	20	-113,985	0,01924	20	0,04652	-112,987	0,00336	20	-112,652	0,03449	20	0,33526	0,18718
-115	-115,003	0,00358	20	-114,992	0,02277	20	0,01109	-114,012	0,00451	20	-113,684	0,02483	20	0,32784	0,1617
-116	-116,01	0,00199	20	-116,025	0,02209	20	-0,01454	-114,966	0,00231	20	-114,654	0,02429	20	0,31231	0,13242
-117	-117,019	0,00222	20	-117,053	0,0169	20	-0,03463	-115,974	0,00184	20	-115,695	0,03253	20	0,27938	0,102795
-118	-118,027	0,00211	20	-118,086	0,01261	20	-0,05901	-116,983	0,00148	20	-116,743	0,01638	20	0,24022	0,07701
-119	-119,035	0,00268	20	-119,096	0,02245	20	-0,06131	-117,99	0,00184	20	-117,777	0,0257	20	0,21303	0,06436
-120	-120,011	0,00623	20	-120,042	0,01706	20	-0,03063	-118,998	0,00184	20	-118,808	0,01969	20	0,19003	0,099745
-121	-120,998	0,00981	20	-120,963	0,02387	20	0,03498	-119,973	0,00423	20	-119,742	0,01899	20	0,23012	0,12618
-122	-122,021	0,0053	20	-121,981	0,0181	20	0,04048	-120,981	0,00431	20	-120,764	0,02487	20	0,21738	0,154345
-123	-123,03	0,00584	20	-122,933	0,01208	20	0,09675	-121,987	0,00426	20	-121,719	0,01676	20	0,26821	0,200895
-124	-124,002	0,00259	20	-123,874	0,01337	20	0,12861	-122,997	0,00466	20	-122,692	0,02135	20	0,30504	0,224035
-125	-125,01	0,00247	20	-124,85	0,01546	20	0,16058	-123,966	0,00259	20	-123,647	0,01939	20	0,31946	0,270785
-126	-126,018	0,00218	20	-125,878	0,02607	20	0,14028	-125,011	0,00293	20	-124,63	0,02207	20	0,38099	0,227565
-127	-127,023	0,00889	20	-126,859	0,024	20	0,1644	-125,982	0,00261	20	-125,667	0,02499	20	0,31485	0,241035
-128	-128,03	0,00687	20	-127,863	0,02045	20	0,16693	-126,991	0,00276	20	-126,673	0,02776	20	0,31767	0,2412
-129	-129,009	0,00343	20	-128,842	0,02704	20	0,16668	-128,006	0,00762	20	-127,691	0,01308	20	0,31547	0,25193
-130	-130,015	0,00374	20	-129,809	0,01464	20	0,20524	-128,971	0,00454	20	-128,634	0,01328	20	0,33718	0,27907
-131	-131,022	0,00386	20	-130,765	0,02224	20	0,25731	-129,982	0,00496	20	-129,629	0,02711	20	0,3529	0,32054
-132	-132,03	0,00554	20	-131,763	0,01561	20	0,26693	-130,99	0,00902	20	-130,607	0,02644	20	0,38377	0,34459
-133	-132,99	0,01222	20	-132,717	0,02857	20	0,27301	-131,996	0,00298	20	-131,574	0,0299	20	0,42225	0,348575
-134	-134,011	0,00358	20	-133,723	0,01859	20	0,28859	-132,968	0,00293	20	-132,544	0,02595	20	0,42414	0,34084
-135	-135,019	0,00439	20	-134,763	0,02921	20	0,25638	-133,974	0,00199	20	-133,581	0,00806	20	0,39309	0,314745
-136	-136,026	0,00234	20	-135,789	0,0227	20	0,23655	-134,983	0,00241	20	-134,61	0,01782	20	0,37311	0,304725
-137	-137,034	0,00117	20	-136,815	0,01334	20	0,2191	-135,992	0,00219	20	-135,619	0,01857	20	0,3729	0,28472
-138	-138,008	0,00315	20	-137,782	0,02065	20	0,22659	-136,999	0,00241	20	-136,648	0,03576	20	0,35034	0,263545
-139	-139,014	0,00261	20	-138,762	0,02255	20	0,2516	-137,975	0,00546	20	-137,674	0,02486	20	0,3005	0,297475
-140	-140,023	0,00293	20	-139,778	0,03252	20	0,24429	-138,978	0,00234	20	-138,635	0,02249	20	0,34335	0,30761
-141	-141,028	0,00893	20	-140,805	0,04607	20	0,22298	-139,986	0,00218	20	-139,615	0,02299	20	0,37093	0,2726
-142	-142	0,00554	20	-141,802	0,02188	20	0,19838	-140,994	0,00273	20	-140,672	0,02995	20	0,32222	0,239345
-143	-143,011	0,00526	20	-142,833	0,01753	20	0,17719	-141,966	0,00594	20	-141,686	0,02912	20	0,28031	0,20958
-144	-144,018	0,00378	20	-143,863	0,02081	20	0,15483	-143,013	0,00585	20	-142,771	0,01896	20	0,24197	0,192655
-145	-145,025	0,00546	20	-144,894	0,02501	20	0,13075	-143,984	0,00541	20	-143,754	0,02105	20	0,23048	0,155985
-146	-146,034	0,00356	20	-145,898	0,02424	20	0,13521	-144,999	0,00945	20	-144,818	0,01867	20	0,18122	0,15591
-147	-147,009	0,00374	20	-146,853	0,03337	20	0,15661	-146,005	0,00723	20	-145,828	0,02105	20	0,17661	0,178535
-148	-147,997	0,01067	20	-147,861	0,02174	20	0,13659	-146,97	0,00328	20	-146,77	0,01347	20	0,20046	0,167255
-149	-149,01	0,00828	20	-148,859	0,02213	20	0,15089	-147,979	0,00222	20	-147,781	0,02654	20	0,19792	0,156815
-150	-150,031	0,00148	20	-149,874	0,02173	20	0,15642	-148,987	0,00245	20	-148,825	0,01909	20	0,16274	0,166645
-151	-151,003	0,00264	20	-150,855	0,0255	20	0,14768	-149,996	0,00184	20	-149,819	0,01822	20	0,17687	0,15731
-152	-152,012	0,0019	10	-151,887	0,0186	10	0,1244	-151,001	0,00211	20	-150,834	0,02253	20	0,16694	0,10992

Anexo F2: Certificado de Calibração de Autocolimadores

Instituto Português da  Qualidade



GOVERNO DE
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel (+351) 212 948 185
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 101.05/1340629

PAGE 1 de 2
PAGE 1 of 2

ENTIDADE

NOME ACTF – Laboratório de Comprimento
ENDEREÇO Rua António Gião, 2, 2829-513 Caparica, PORTUGAL

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Autocolimador
MARCA Moller-Wedel
MODELO Elcomat HR;
NÚMERO 0152
CONSTITUIÇÃO Autocolimador

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO -----
INTERVALO DE INDICAÇÃO -150° a 150°
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR 0,01 "

OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração
DATA De 2013-03-20 a 2013-04-27
MÉTODO Comparação
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA Technical Protocol EURAMET.L-K3a.2009
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Às unidades SI através do padrão: Mesa Rotativa n/s M338
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA $t = (20,3 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$
INCERTEZA EXPANDIDA $U = 1''$
RESULTADO Páginas seguintes

CAPARICA, 11 de setembro de 2013

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO

EDUARDA FILIPE
DIRETORA
DEPARTAMENTO DE METROLOGIA

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 101.05/1340629

PÁGINA 2 de 2

RESUMO DO MÉTODO

A calibração do eixo X de medição do autocolimador foi realizada utilizando como padrão de referência a mesa rotativa IPQ n/s M338. Para este fim, utilizou-se a reflexão no espelho plano, colocado sobre a mesa rotativa, a uma distância de 300 mm do autocolimador. O percurso do feixe de medição horizontal do eixo X do autocolimador foi orientado directamente para o espelho plano. A calibração foi realizada com a abertura total da janela do autocolimador.

Os valores de referência angular da mesa rotativa foram comparados com o valor indicado pelo autocolimador no intervalo de medição de $\pm 150''$ com passo de $1''$.

RESULTADOS

Os erros de medição segundo o eixo X (indicação do autocolimador menos os valores de referência) são apresentados no gráfico seguinte (em relação ao valor médio a $0''$).

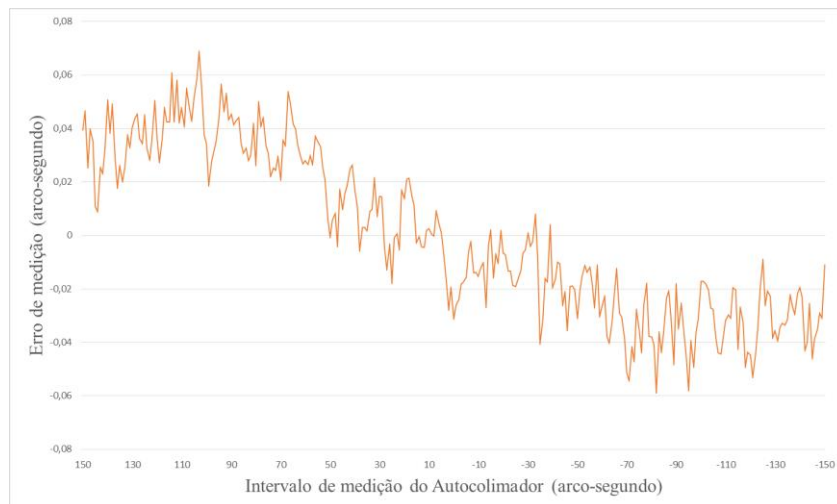


Gráfico 1- Eixo de medição X. Intervalo de medição de $\pm 150''$.

A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k = 2,00$ o qual para uma distribuição-t com $\nu_{ef} = \infty$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de 95%, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)*.

FERNANDA SARAIVA
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
ÂNGULO