
Pedro Jorge da Eira Frutuoso

Desenvolvimento de um sistema de apoio à
calibração dimensional de blocos padrão

Desenvolvimento de um sistema de apoio à calibração dimensional de blocos padrão

Pedro Jorge da Eira Frutuoso

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em
Automação, Instrumentação e Controlo

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Mestrado de Automação, Instrumentação e Controlo

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação realizada sob a supervisão de

Doutora Maria Teresa Restivo

Doutor Joaquim Gabriel Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este documento descreve o desenvolvimento das soluções implementadas para o melhoramento do Sistema Automático de Calibrar Blocos Padrão (SACBP) existente no CATIM.

A apresentação das propostas de solução para melhoria do sistema SACBP teve como objectivo mostrar a forma, o modo de implementação e a adequação dessas soluções às exigências normativas, recomendações e orientações da literatura especializada. O desenvolvimento do sistema passou, fundamentalmente, pelos pontos em que as limitações eram evidentes e se exigia a sua actualização: segurança, monitorização e registo das condições ambientais e monitorização e processamento dos dados de medição. Ao nível da segurança conseguiu-se fazer alterações que privilegiaram a prevenção e que têm como principal objectivo, portanto, diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes, optimizando o funcionamento do sistema. A criação dum *sistema de medição* e registo das condições ambientais no ambiente de trabalho trouxe melhorias substanciais ao processo de *calibração* dos blocos padrão permitindo obter um conhecimento detalhado da sua evolução ao longo do tempo. Simultaneamente, permitiu ter acesso à informação, em tempo real, sobre as condições de temperatura durante a *calibração*. A melhoria da produtividade e a diminuição da probabilidade de ocorrência de erros advindos da introdução da informação pelo operador foram conseguidas através do uso de software especificamente desenvolvido para o processamento automático dos dados de *calibração* e elaboração do respectivo certificado.

Foram realizadas reflexões e estudos que incidiram sobre os blocos padrão, a sua *calibração* e o cálculo da *incerteza expandida de medição*. Com mais detalhe, fez-se a descrição do sistema SACBP, apresentou-se o procedimento de *calibração* e descreveu-se todos os conceitos e informações para o cálculo da *incerteza de medição*, apresentando-se os resultados dos valores obtidos da sua *incerteza expandida de medição*, contabilizando a contribuição das implementações para a melhoria do desempenho do SACBP. Desta forma, conseguiu-se compilar de forma sistematizada toda a informação relevante (conceitos, características, utilização, conservação, *calibração*, etc.) associada aos blocos padrão para referência futura.

Finalmente, apresentam-se algumas sugestões para futuros desenvolvimentos, em particular a substituição do actual sistema de controlo. Identificou-se como interessante esta alteração porque tornaria o sistema aberto ao nível do controlo, da gestão da informação e da adaptação a alterações dos parâmetros normativos.

Abstract

This document describes the development of the solutions implemented for the improvement of the automatic system for gauge blocks calibration (SACBP) existing in the CATIM. The presentation of the proposals of solution for improvement of SACBP system had as objective to show the form, the way of implementation and the adequacy of these solutions to the normative requirements, recommendations and orientations of specialized literature. The development of the system passed, basically, for the points where the limitations were notorious and if it demanded its update: security, monitor and register of the ambient conditions as well as the processing of the measurement data. The level of the security was obtained by making alterations that had privileged the prevention, which was the main objective, therefore, to diminish the probability of occurrence of accidents, optimising the functioning of the system. The creation of a system of measurement and register of the ambient conditions in the work environment brought substantial improvements to the process of calibration of the standard gauge blocks allowing to get a detailed knowledge of its evolution through time. Simultaneously, it allowed having access to the information, in real time, on the temperature conditions during the calibration. The improvement of the productivity and the reduction of the probability of operator's errors occurrence by the introduction of the information had been obtained through the use of software specifically developed for the automatic processing of the calibration data and certificate elaboration. Reflections and studies had been carried through concerning on what had happened to the gauge blocks standard, its calibration and the calculation of the expanded uncertainty of measurement. With more detail, it was done the description of SACBP system, presented the calibration procedure and described all the concepts and information for the calculation of the measurement uncertainty, presenting itself the results of the gotten values of its expanded uncertainty of measurement, entering the contribution of the implementations for the improvement of the SACBP performance. With this, the excellent relevant information obtained was systematic compiled (concepts, characteristics, use, conservation, calibration, etc.). Associated to the standard gauge blocks for future reference.

Finally, some suggestions for future developments are presented, in particular the replacement of the current system of control. This alteration was identified as interesting because the system would then become at the level of the control, of the management of the information and the adaptation the alterations of the normative parameters, an open system.

Prefácio

Não se pode deixar de referir a influência que as funções profissionais desempenhadas pelo autor deste trabalho, enquanto responsável pela área da Metrologia Dimensional do Centro de Apoio à Indústria Metalomecânica (CATIM), tiveram na escolha do tema desta dissertação. A este facto não foi estranho as relações de colaboração, de longa data, com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que permitiram avaliar e enquadrar este trabalho no âmbito de uma tese do Mestrado de Automação, Instrumentação e Controlo (MAIC) da FEUP.

Assim, surgiu naturalmente a possibilidade de implementar melhoramentos no sistema SACBP para a melhoria do seu desempenho e da sua segurança, bem como a criação de um histórico informático no âmbito das calibrações de blocos padrão.

Este trabalho iniciou no CATIM uma prática de actualização tecnológica de equipamentos ligados à metrologia recorrendo às suas capacidades e conhecimentos internos.

Ao autor deste trabalho permitiu alargar o conhecimento para a resolução de projectos desta natureza, bem como aprofundar questões sobre a problemática da calibração de blocos padrão.

É de realçar que este trabalho não seria tão atractivo e valioso sem a componente de utilidade prática que lhe está associada.

A procura de informações sobre processos de actualização de sistemas idênticos ao sistema SACBP foi a principal dificuldade encontrada. Foram estabelecidos alguns contactos com entidades envolvidas no desenvolvimento e utilização destes sistemas. Em particular, tomou-se conhecimento que o Laboratoire National D' Essais (França) – LNE se encontrava, igualmente, num processo de actualização de um sistema semelhante ao SACBP. Contudo, a solução adoptada não é ainda conhecida até ao termo de validação das características metrológicas, em curso.

Os objectivos do trabalho estavam centrados no desenvolvimento de uma interface para monitorização e processamento dos dados da medição de acordo com a norma ISO 3650, na *medição* de parâmetros ambientais (temperatura e humidade), na introdução de compensações e cálculo final da *incerteza de medição*, na implementação de acções acrescidas de segurança com vista à protecção do sistema SACBP e no estudo de viabilidade da substituição do sistema de controlo inerente ao equipamento (de modo a permitir a implementação de um sistema totalmente aberto, com flexibilidade para alterações de parâmetros normativos).

Por último, o autor gostaria de agradecer aos seus orientadores pelo esforço que fizeram para que este trabalho fosse possível de realizar e ao CATIM por facultar todas as condições para realização do mesmo e, ainda, aos colaboradores que apoiaram directamente o desenvolvimento do trabalho.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. METROLOGIA DIMENSIONAL – CONCEITOS GERAIS	3
1.2. BLOCOS PADRÃO	4
1.2.1. DETERIORAÇÃO DOS BLOCOS PADRÃO	5
1.2.2. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO	6
1.3. CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÃO	8
1.3.1. SISTEMA MANUAL	8
1.3.2. SISTEMA AUTOMÁTICO	9
1.4. OBJECTIVOS – PROPOSTA DE SOLUÇÃO	12
1.5. DESCRIÇÃO RESUMIDA DO TRABALHO	13
 2. SISTEMA AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÃO	 14
2.1. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO - NORMA ISO 3650	15
2.1.1. FASES DA CALIBRAÇÃO	16
2.1.2. DEFINIÇÕES	17
2.1.3. UNIDADE DE MEDIÇÃO, RASTREABILIDADE E CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA	18
2.1.4. DIMENSÕES E PROPRIEDADES	19
2.1.5. DETERMINAÇÃO DOS COMPRIMENTOS	20
2.1.6. DETERMINAÇÃO DA PLANEZA	23
2.1.7. TOLERÂNCIAS	23
2.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	24
 3. SISTEMA DE SEGURANÇA	 28
3.1. LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE SEGURANÇA DE ORIGEM	29
3.2. ESTRATÉGIA ADOPTADA	31
3.3. IMPLEMENTAÇÃO E TESTE	32

4. CONDIÇÕES AMBIENTAIS	35
4.1. ESTUDO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS	35
4.1.1. PRESERVAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO SISTEMA SACBP	36
4.1.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	37
4.1.3. REQUISITOS DA GRANDEZA HUMIDADE	38
4.2. SELECÇÃO DE TRANSDUTORES	39
4.3. APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO	41
4.4. VALIDAÇÃO E VANTAGENS DA SOLUÇÃO	45
5. INTERFACE PARA MONITORIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE MEDIÇÃO	46
5.1. REQUISITOS PARA A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	46
5.2. ALTERAÇÕES DO SISTEMA ORIGINAL	47
5.3. DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DE INTERFACE DESENVOLVIDA	48
5.4. OBJECTIVOS E GANHOS	53
6. INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO	55
6.1. ERROS NA MEDIÇÃO	55
6.2. CONCEITO E IMPORTÂNCIA DA INCERTEZA NO RESULTADO DA MEDIÇÃO	56
6.3. REQUISITOS DE MEDIÇÃO	56
6.4. INCERTEZA NO RESULTADO DA MEDIÇÃO	57
6.5. GUIA PARA A EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	59
6.6. MODELO MATEMÁTICO PARA A EXPRESSÃO DA INCERTEZA EXPANDIDA	60
6.7. DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA EXPANDIDA DE CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÃO	66
6.7.1. MODELIZAÇÃO	66
6.7.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	72
6.8. MELHORIA DA INCERTEZA DE CALIBRAÇÃO	77
7. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	80
7.1. APRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS UNIDADES DO SISTEMA SACBP	80
7.2. PROPOSTA DE RESOLUÇÃO	85

8. CONCLUSÕES	86
BIBLIOGRAFIA	89
ANEXO A - CARTA DE INTERPRETAÇÃO DE <i>PLANEZA</i> E TOLERÂNCIAS	92
ANEXO B - CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO	95
ANEXO C - CONTACTOS PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	104

Índice das Figuras

Figura 1.1 – Metrologia Industrial	2
Figura 1.2 – Exemplos de blocos padrão de aço de alta qualidade	4
Figura 1.3 – Sistema baseado no método absoluto: interferómetro LASER	6
Figura 1.4 – Sistema baseado no método diferencial	7
Figura 1.5 – Sistema manual de <i>calibração</i> de blocos padrão	8
Figura 1.6 a) e b) – Colocação de blocos padrão	9
Figura 1.6 c) e d) – Posicionamento dos blocos padrão nas posições de <i>calibração</i>	9
Figura 1.7 – Sistema automático de calibrar blocos padrão	10
Figura 1.8 – Colocação dos blocos nos <i>escantilhões</i>	10
Figura 2.1 – Design original do sistema SACBP	14
Figura 2.2 – Caixa de blocos padrão	15
Figura 2.3 – Utilização de pedra de “Arkansas” para remover pequenos defeitos	16
Figura 2.4 – Parâmetros a controlar na <i>calibração</i>	18
Figura 2.5 – <i>Planeza</i> da face de medição	18
Figura 2.6 – Colocação dos blocos padrão no carrossel no respectivo <i>escantilhão</i>	20
Figura 2.7 – <i>Medição</i> do comprimento central por comparação tomando a distância segundo a normal que passa pelos pontos centrais das faces de medição	21
Figura 2.8 – Comparador de blocos padrão de comprimento nominal até 100mm	21
Figura 2.9 – <i>Medição</i> no sistema SACBP	22
Figura 2.11 – Exemplo de medição da <i>planeza</i> dos blocos	23
Figura 1.1 – Os 5 pontos submetidos a medição	23
Figura 2.12 – Aspecto geral do sistema SACBP	24
Figura 2.13 – Carrossel e <i>escantilhões</i> do sistema SACBP	24
Figura 2.14 – Mesa de posicionamento de precisão	24
Figura 2.15 – Coluna vertical	25
Figura 2.16 – Banca de controlo	25
Figura 2.17 – Dispositivo indicador da unidade de medição TESAMODUL	26
Figura 2.18 – LVDT superior móvel da coluna vertical	26
Figura 2.19 – LVDT inferior fixo na mesa de posicionamento	26
Figura 3.1 – Dispositivos de segurança de origem	28
Figura 3.2 a) – Posicionamento do LVDT superior	30
Figura 3.2 b) – Transporte do <i>escantilhão</i>	30
Figura 3.2 c) – Posição de <i>calibração</i>	30
Figura 3.2 d) – Situação de colisão	30
Figura 3.3 – Distância de retracção mecânica, <i>dr</i> , do LVDT superior	30

Figura 3.4 – Barreira de protecção à esquerda do LVDT superior	31
Figura 3.5 – Localização dos detectores de proximidade	32
Figura 3.6 – Fluxograma do modo de funcionamento do sistema de segurança	33
Figura 3.7 – Esquema do circuito do sistema de segurança	34
Figura 4.1 – <i>Transdutores</i> Vaisala	40
Figura 4.2 – Modelo genérico de uma <i>medição</i>	42
Figura 4.3 – <i>Sistema de medição</i> das condições ambientais implementado	42
Figura 4.4 – <i>Transdutor</i> VAISALA HMP231 montado na zona de <i>medição</i>	43
Figura 4.5 – <i>Transdutor</i> VAISALA HMD40Y no centro da sala	43
Figura 4.6 – Menu de apresentação de toda a informação das condições ambientais	44
Figura 4.7 – Menu de apresentação, do <i>transdutor</i> da sala, da informação em gráfico e tabela	44
Figura 5.1 – Menu inicial	48
Figura 5.2 – Menu de entrada - Escolha do número de blocos padrão ou de certificado já elaborado	49
Figura 5.3 – Menu dados do cliente e de dados de <i>calibração</i>	50
Figura 5.4 – Menu de carregar o ficheiro de dados	50
Figura 5.5 – Menu para introdução de <i>planeza</i> e números de série	50
Figura 5.6 – Menu de introdução manual dos resultados de <i>calibração</i>	51
Figura 5.7 – Menu de análise de resultados de <i>calibração</i>	51
Figura 5.8 – Menu de dados dos blocos padrão e equipamentos utilizados	51
Figura 5.9 – Menu final	52
Figura 5.10 – Menu de visualização e impressão do certificado de <i>calibração</i>	53
Figura 5.11 – Menu de visualização dos resultados de <i>calibração</i>	53
Figura 5.12 – Menu de visualização e impressão dos dados de <i>calibração</i>	53
Figura 5.13 – Menu para gravar o ficheiro final	53
Figura 6.1 – Etapas para determinação da <i>incerteza de medição</i> após operação de <i>medição</i>	58
Figura 6.2 – Esquema descritivo dos factores que influenciam a <i>medição</i>	67
Figura 7.1 – Elementos accionadores do sistema SACBP	81
Figura 7.2 – Esquema de localização dos elementos e representação dos eixos de movimento (X, Y e Z)	82
Figura 7.3 – Esquema de ligação entre os elementos do sistema SACBP	83
Figura A.1 – Exemplo de carta de interpretação de <i>planeza</i>	92
Figura B.1 – Certificado de <i>calibração</i> de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 1ª página	95
Figura B.2 – Certificado de <i>calibração</i> de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 2ª página	96
Figura B.3 – Certificado de <i>calibração</i> de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 3ª página	97
Figura B.4 – Certificado de <i>calibração</i> de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 4ª página	98
Figura B.5 – Certificado de <i>calibração</i> do <i>sistema de medição</i> de temperatura LMT20045000270/10 - 1ª página	99
Figura B.6 – Certificado de <i>calibração</i> do <i>sistema de medição</i> de temperatura LMT20045000270/10 - 2ª página	100
Figura B.7 – Certificado de <i>calibração</i> do conjunto dos blocos padrão de referência - 1ª página	101
Figura B.8 – Certificado de <i>calibração</i> do conjunto dos blocos padrão de referência - 2ª página	102

Índice das Tabelas

Tabela 1.1 – Blocos padrão norma ISO 3650 [4] – grau/aplicação	5
Tabela 2.1 – Dimensões gerais da secção dos blocos padrão	19
Tabela 2.2 – Variação máxima do comprimento por ano	19
Tabela 3.1 – Descrição dos símbolos da Figura 3.7	34
Tabela 4.1 – Requisitos da temperatura	38
Tabela 4.2 – Características do <i>transdutor</i> HMD40Y	41
Tabela 4.3 – Características do <i>transdutor</i> HMP231	41
Tabela 6.1 – Factores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efectivos vef	65
Tabela 6.2 – Lista de símbolos	67
Tabela 6.3 – Estimativa do valor I_x e avaliação da <i>incerteza expandida de calibração</i> para o bloco padrão de 5 mm	72
Tabela 6.4 – Estimativa do valor I_x e avaliação da <i>incerteza expandida de calibração</i> para o bloco padrão de 25 mm	73
Tabela 6.5 – Estimativa do valor I_x e avaliação da <i>incerteza expandida de calibração</i> para o bloco padrão de 50 mm	74
Tabela 6.6 – Estimativa do valor I_x e avaliação da <i>incerteza expandida de calibração</i> para o bloco padrão de 75 mm	75
Tabela 6.7 – Estimativa do valor I_x e avaliação da <i>incerteza expandida de calibração</i> para o bloco padrão de 100 mm	76
Tabela 6.8 – <i>Incertezas expandidas da calibração</i> dos blocos padrão	77
Tabela 7.1 – Elementos accionadores	84
Tabela 7.2 – Elementos controladores	84
Tabela 7.3 – Elementos de <i>medição</i>	84
Tabela A.1 – Tolerância de <i>planeza</i> , t_f	93
Tabela A.2 – Limites dos desvios, t_e , do comprimento de todos os pontos em relação ao comprimento nominal, l_n , e tolerância, t_v , da variação dos comprimentos	93

Lista de abreviaturas

CATIM - Centro de Apoio à Tecnológico Indústria Metalomecânica - Instituição privada de utilidade pública sem fins lucrativos, criada em 1986, e que resultou da associação de interesses, de empresas industriais e respectivas associações com organismos públicos. Tem como missão contribuir para a inovação e competitividade das indústrias nacionais da metalomecânica e sectores afins ou complementares. Está vocacionado para apoiar técnica e tecnologicamente o sector metalúrgico e metalomecânico, em especial as PME's.

EA - European Cooperation for Accreditation of Laboratories.

IPQ - Instituto Português de Qualidade – Portugal

ISO – International Organization for Standardization

LabVIEW – Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LNE - Laboratoire National D' Essais – França

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

NIST - National Institute of Standards and Technology – USA

NPL - National Physical Laboratory – Reino Unido

SACBP - Sistema Automático de Calibração de Blocos Padrão

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

Glossário

O glossário apresenta-se ordenado alfabeticamente com indicação do documento de origem. Não é feita uma transcrição total das definições apresentadas nos documentos originais. Frequentemente as notas foram retiradas, sempre que se considerou que, no âmbito do presente documento, estas não apresentavam relevância.

As designações das definições, na dissertação, estão escritas em itálico.

Cadeia de medição – Sequência de elementos de um *instrumento de medição* ou de um *sistema de medição* que constitui o trajecto do *signal de medição* desde a entrada até à saída [VIM, 4.4] [1].

Calibração – Conjunto de operações que estabelecem, em condições especificadas, a relação entre valores de grandezas indicados por um *instrumento de medição* ou *sistema de medição*, ou valores representados por uma medida materializada ou um de referência e os correspondentes valores realizados por *padrões* [VIM, 6.11] [1].

Coefficiente de sensibilidade associada a uma estimativa de entrada – Acréscimo ou variação diferencial na *estimativa de saída* gerada por um acréscimo na *estimativa de entrada* dividida pelo acréscimo da *estimativa de entrada* [EA-4/02, B2] [18].

Condições de referência – Condições de utilização prescritas para ensaios de funcionamento de um *instrumento de medição* ou para o comparação interlaboratorial de resultados de *medição* [VIM, 5.7] [1].

Desvio padrão experimental – Parâmetro s que caracteriza a dispersão dos resultados obtidos numa série de n *medições* da mesma *mensuranda*, dado pela fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Erro aleatório – Resultado da *medição* subtraído da média que resulta de um número infinito de *medições* da mesma *mensuranda* em condições de repetibilidade. [VIM, 3.13] [1]

Erro de medição – Diferença algébrica entre o resultado da *medição* e o *valor verdadeiro* da *mensuranda* [VIM, 3.10] [1].

Erro sistemático – Média que resultaria de um número infinito de *medições* da mesma *mensuranda* em condições de repetibilidade subtraído do *valor verdadeiro* da *mensuranda*. [VIM, 3.14] [1]

Escantilhão - Acessório que permite o posicionamento correcto dos blocos padrão nos *sistemas de medição* usados no *procedimento de medição* pelo *método de medição* diferencial.

Estabilidade – Aptidão de um *instrumento de medição* para conservar no tempo as características metrológicas [VIM, 5.14] [1].

Estimativa de entrada – Estimativa de uma *grandeza de entrada* utilizada na avaliação do *resultado de uma medição* [EA-4/02, B8] [18].

Estimativa de saída – *Resultado de uma medição* calculada a partir das estimativas de entrada através de uma determinada função modelo [EA-4/02, B9] [18].

Exactidão de medição – Aproximação entre o resultado da *medição* e o *valor verdadeiro* da *mensuranda* [VIM, 3.5] [1].

Exactidão de um instrumento de medição – Aptidão de um *instrumento de medição* para dar indicações próximas do verdadeiro valor da grandeza medida [VIM, 5.18] [1].

Factor de expansão – Factor numérico utilizado para multiplicar a *incerteza de medição* padrão para obter a *incerteza de medição* expandida [EA-4/02, B9] [18].

Gama de medição – Conjunto dos valores da *mensuranda* para os quais o erro do *instrumento de medição* é supostamente mantido entre determinados limites [VIM, 5.1] [1].

Gama nominal – Gama de indicação obtida, para uma posição particular dos comandos de um *instrumento de medição* [VIM, 5.1] [1].

Grandeza de entrada – Grandeza de que depende a *mensuranda*, tomada em consideração no processo de avaliação do *resultado de uma medição* [EA-4/02, B11] [18].

Grandeza de saída – Grandeza que representa a *mensuranda* na avaliação de uma *medição* [EA-4/02, B12] [18].

Grau dos blocos padrão - são qualidades (ou graus de *exactidão*) exigidas na fabricação referentes aos valores das tolerâncias dimensionais, das tolerâncias geométricas e da estabilidade dimensional dos blocos padrão.

Graus de liberdade efectivos – Medida da fiabilidade da *incerteza padrão da estimativa de saída* [EA-4/02, Anexo E] [18].

Incerteza de medição – Parâmetro associado ao resultado da *medição*, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à *mensuranda* [VIM, 3.9] [1]

Incerteza expandida de medição – Parâmetro que define o intervalo do *resultado de medição*, em que se espera estar incluída uma fracção da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à *mensuranda* [EA-4/02, B13] [18].

Incerteza padrão – *Incerteza de medição* expressa como desvio padrão [EA-4/02, B15] [18].

Instrumento de medição – Dispositivo destinado à execução da *medição*, isolado ou em conjunto com equipamentos suplementares [VIM, 4.1] [1].

Medição – Conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor de uma grandeza [VIM, 2.1] [1].

Mensuranda – Grandeza particular submetida à *medição* [VIM, 2.6] [1].

Método de medição – Sequência lógica de operações, descritas genericamente, utilizadas na execução de *medições* [VIM, 2.4] [1].

Operação de medição – Avaliação de uma *mensuranda* segundo a sua definição [ISO/TS 14253-2:1999, 3.3] [16]

Padrão – Medida materializada, *instrumento de medição*, material de referência ou *sistema de medição* destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade, ou um ou mais valores de uma grandeza para servirem de referência [VIM, 6.1] [1].

Padrão de referência – Padrão, em geral da mais elevada qualidade metrológica disponível num dado local, ou organização, do qual derivam as *medições* aí efectuadas [VIM, 6.6] [1].

Padrão de trabalho – Padrão que é utilizado correntemente para calibrar ou verificar medidas materializadas, *instrumentos de medição* ou materiais de referências [VIM, 6.7] [1].

Padrão internacional – Padrão reconhecido por um acordo internacional para servir de base internacional à fixação dos valores de outros *padrões* da grandeza a que respeita [VIM, 6.2] [1].

Padrão nacional – Padrão reconhecido por uma determinação legal nacional para servir de base, num país, à fixação dos valores de outros *padrões* da grandeza a que respeita [VIM, 6.3] [1].

Paralelismo - Quando no trabalho se falar em paralelismo refere-se à zona de tolerância limitada por dois planos distantes de uma distância (valor de paralelismo) e paralelos ao plano de referência [12].

Planeza - Quando no trabalho se falar em *planeza* de uma superfície refere-se à tolerância na planura da superfície. É a menor distância entre dois planos paralelos e que contêm a superfície [12].

Princípio de medição – Fundamento científico da *medição* [VIM, 2.3] [1].

Procedimento de medição – Conjunto das operações descritas pormenorizadamente, envolvidas na execução de uma *medição* particular, segundo um dado método [VIM, 2.5] [1].

Rastreabilidade – Propriedade do *resultado de uma medição* ou o valor de um padrão que consiste em poder relacionar-se a referências determinadas, geralmente *padrões nacionais* ou internacionais, por intermédio de uma cadeia ininterrupta de comparações, tendo todas as incertezas determinadas [VIM, 6.10] [1].

Resolução – Menor diferença entre indicações de um dispositivo indicador que se podem distinguir significativamente [VIM, 5.12] [1].

Resultado de uma medição – Valor atribuído a uma *mensuranda*, obtido na *medição* [VIM, 5.12] [1].

Sensor – Elemento de um *instrumento de medição* ou de uma *cadeia de medição* que é directamente afectado pela *mensuranda* [VIM, 4.14] [1].

Sinal de medição – Grandeza que representa a *mensuranda* e que lhe está funcionalmente ligada [VIM, 2.8] [1].

Sistema de medição – Conjunto completo de *instrumentos de medição* e outros dispositivos montados para executar uma *medição* específica [VIM, 4.5] [1].

Transdutor de medição – Dispositivo que faz corresponder, segundo uma lei determinada, uma *grandeza de saída* a uma *grandeza de entrada* [VIM, 4.3] [1].

Valor convencionalmente verdadeiro – Valor atribuído a uma grandeza particular e aceite, por vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada a um determinado objectivo [VIM, 1.20] [1].

Valor nominal – Valor arredondado ou aproximado de um *instrumento de medição*, para auxiliar a sua utilização [VIM, 5.3] [1].

Valor verdadeiro – Valor consistente com a definição de uma dada grandeza particular. É um valor que seria obtido numa *medição* perfeita. Valores verdadeiros são indetermináveis por natureza [VIM, 1.19] [1].

Variância – Valor esperado do quadrado do desvio do valor esperado de uma variável aleatória [EA-4/02, B23] [18].

1. Introdução

A Metrologia (do grego metron, medida e logos, ciência) é a ciência da *medição* [1]. Trata da investigação, do desenvolvimento e da utilização dos meios apropriados para a *medição* rigorosa de todas as grandezas físicas.

Seja qual for a área, a Metrologia faz parte da nosso dia-a-dia. Actualmente, é difícil descrever um objecto ou processo de fabrico sem que se faça referência, pelo menos indirectamente, a grandezas físicas (por exemplo dimensões, peso, etc.). Porém, a relação que a maioria dos agentes envolvidos em tais processos mantém com a *medição* é exercida sem que disso se tome total consciência. Na verdade, a *medição* não é uma actividade técnica que só interessa a quem se especializa nesta área, mas, pelo contrário, assume-se hoje como uma componente essencial da dinâmica do desenvolvimento económico e social.

Na Metrologia, o domínio do conhecimento relativo à *medição* contempla todos os aspectos teóricos e práticos relativos à *medição*, qualquer que seja o seu nível de *exactidão* e a área da ciência e da tecnologia a que se referem [1]. Neste sentido, é possível definir três níveis de actuação com diferentes âmbitos de complexidade e *exactidão*: Metrologia Científica, Metrologia Legal e Metrologia Industrial.

Pretende-se assegurar, através da Metrologia Científica, a realização física das unidades de medida e das constantes físicas fundamentais mediante a conservação e o desenvolvimento de *padrões* e de instrumentação em laboratórios de investigação adequados, denominados laboratórios primários [2].

A Metrologia Legal verifica a conformidade das unidades, dos *métodos* e dos *instrumentos de medição* com exigências técnicas e jurídicas regulamentares, a fim de assegurar os direitos dos cidadãos do ponto de vista da *exactidão das medições* [2].

A Metrologia Industrial pretende garantir o conhecimento da *incerteza das medições* efectuadas, ao nível do controlo do processo e do produto/serviço, bem como a sua compatibilidade com as especificações definidas na concepção desses processos, produtos ou serviços [2]. Ao longo desta dissertação, o termo Metrologia será usado na acepção restrita de Metrologia Industrial.

Diz um ditado clássico: "Só o que é mensurável pode ser melhorado". Melhorar continuamente é o caminho da sobrevivência de todos os sectores de actividade, sob o impulso da necessidade de satisfazer o cliente, o qual assume uma posição cada vez mais determinante, no direccionamento dos mercados e na determinação da qualidade dos produtos e serviços prestados. Neste sentido, não se pode dissociar a Metrologia da Gestão da Qualidade. A adopção de Sistemas da Qualidade, entendida como uma decisão estratégica das organizações, exige que estas monitorizem os seus processos produtivos, efectuando

medições constantes como ponto de partida para a melhoria do desempenho e para o cumprimento das exigências normativas. Só deste modo se garante que o produto satisfaz os requisitos especificados pelo cliente e/ou os que lhe possam ser regularmente aplicáveis. Para o efeito, será necessário assegurar o rigor, a *exactidão* e a *rastreabilidade* das *medições* efectuadas, fazendo uso da metodologia definida pela Metrologia.

Ao efectuar uma *medição*, deve ser utilizado como referência um *padrão* bem definido, um *método* e um *procedimento* adequado. Tudo isto para que seja obtida uma medida, definida como o *resultado da medição*, que permita caracterizar qualitativa e quantitativamente uma grandeza, independentemente do local ou da pessoa que realizou a *medição*.

A Figura 1.1 procura, de modo sucinto, interligar a Metrologia com os vários campos de aplicação industrial. Este conjunto de elementos inter-relacionados ou interactivos definem o sistema de gestão de medição que, se for eficaz, assegura que os equipamentos e os processos de *medição* sejam os adequados ao uso pretendido. O objectivo de um *sistema de medição* é o de se poder controlar o risco de que o equipamento e os processos de medição (seja no projecto, na produção ou no controlo) possam produzir resultados incorrectos que afectem a qualidade dos produtos da organização [3].

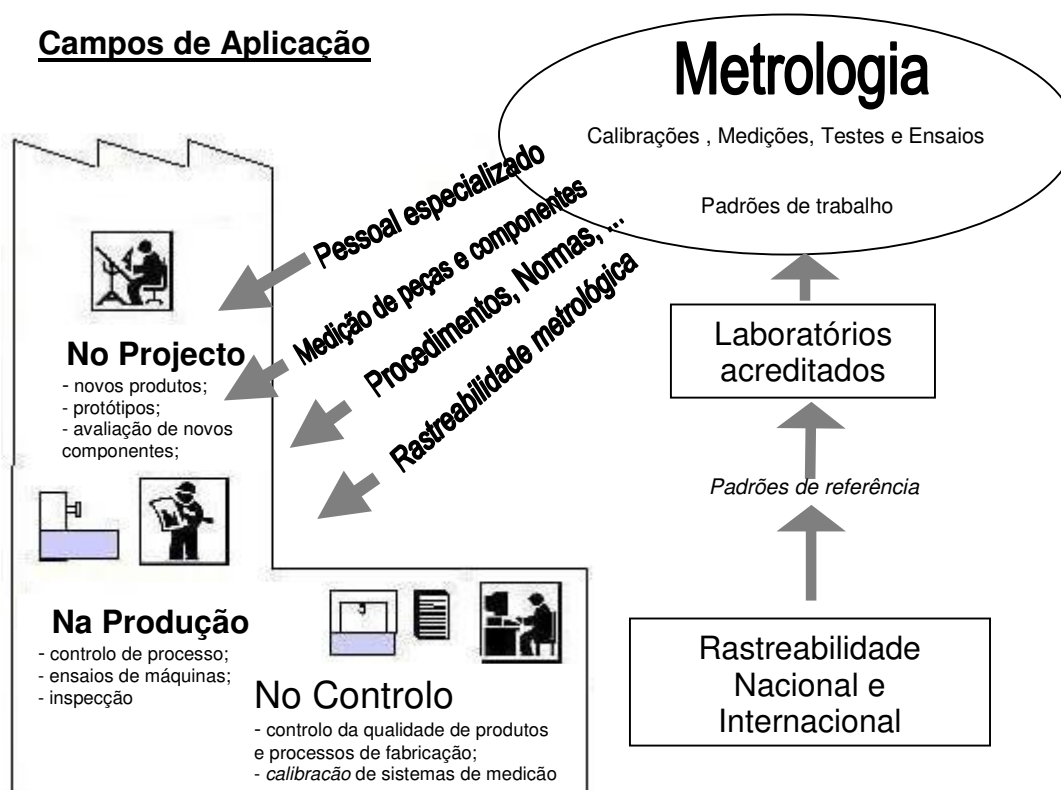


Figura 1.1 – Metrologia Industrial

1.1. Metrologia dimensional – Conceitos gerais

A Metrologia Industrial tem por base um conjunto de laboratórios metrológicos associações industriais ou entidades particulares, com o objectivo de assegurar a *rastreabilidade* das *medições* e o cumprimento dos requisitos especificados, compatíveis com a *incerteza da medição* exigida a nível do processo e do produto/serviço. Estes laboratórios terão necessariamente características diferenciadas e estatutos diversos em função dos seus âmbitos de actuação, dos domínios de acção e dos tipos de actividade que desenvolvem, devendo estar rastreados por laboratórios de nível mais elevado, eventualmente laboratórios de nível primário.

Existem vários domínios de acção mais comuns, entre os quais a Metrologia dimensional, a das temperaturas, a das grandezas eléctricas, a das pressões, etc.

A Metrologia dimensional é, talvez, o domínio de acção mais importante da Metrologia, uma vez que abrange a maior parte dos *padrões e instrumentos de medição* na indústria. Estuda os *métodos* e os *procedimentos de medição* que determinam as grandezas lineares e angulares. Tem aplicação na *medição* de comprimentos (exteriores, interiores, profundidades e alturas) e de ângulos, assim como na avaliação do acabamento superficial.

Na Metrologia dimensional, o conjunto de operações cujo objectivo é determinar o valor de uma grandeza é definido como *medição*. A materialização da grandeza é garantida através da sua relação com outra grandeza da mesma espécie, adoptada como unidade: medir uma grandeza é compará-la com a unidade da mesma espécie estabelecendo a relação entre elas. Na realização de uma *medição* são utilizadas sequências lógicas de operações, designadas por *métodos de medição*. Na Metrologia dimensional destacam-se dois métodos: o *método de medição* absoluto e o *método de medição* diferencial. No *método de medição* absoluto, o valor da grandeza é obtido pela indicação de um *instrumento de medição*. No *método de medição* diferencial, a *mensuranda* é comparada com uma grandeza da mesma natureza de valor conhecido e idêntico ao que se pretende medir. O valor medido resulta da diferença entre a grandeza conhecida (referência) e a grandeza a medir (*mensuranda*), correspondendo o valor desta ao medido somado algebricamente ao valor do *padrão de referência*.

Nenhum valor medido é igual ao *valor verdadeiro* da grandeza que se mediu. O *valor verdadeiro* de uma grandeza é um valor que seria obtido numa medição perfeita. Por natureza, os *valores verdadeiros* são indetermináveis. Neste sentido, toda a *medição* está afectada de um erro. Mesmo que se ignore o sinal desse erro, que pode ser positivo ou negativo, é difícil quantificá-lo. É assim que surge o conceito de *incerteza*, definível como uma estimativa possível do erro associado a qualquer *medição*. A *incerteza* associada ao *resultado de uma medição*, bem como a sua *rastreabilidade*, constituem dois pilares fundamentais para a garantia da fiabilidade dos *resultados das medições*. Se, por um lado, a estimativa da incerteza exige um método de cálculo com base no modelo matemático para a determinação da

grandeza, por outro, a *rastreabilidade* das *medições* exige uma demonstração ou evidência pormenorizada, por exemplo, com base num certificado de *calibração* dos *padrões* e/ou equipamentos [2].

1.2. Blocos padrão

O bloco padrão é a materialização mais exacta da grandeza comprimento utilizada na Metrologia dimensional, destinada a definir e a conservar um determinado comprimento. Tem uma forma paralelepípedica, conforme mostrado na Figura 1.2, e duas faces (designadas faces de medição) planas e paralelas entre si, cuja distância é conhecida com uma exactidão muito elevada.

O bloco padrão está ao serviço do utilizador como elemento de *medição* ou como *padrão*. No primeiro caso pode ser encontrado genericamente em oficinas. Como *padrão* pode ser encontrado num dado local ou organização, do qual derivam as *medições* aí efectuadas (*padrão de referência*), ou pode ser utilizado para calibrar ou verificar medidas materializadas e *instrumentos de medição* (*padrão de trabalho*).

Na Metrologia dimensional, os blocos padrão assumem um papel de grande relevo e estão envolvidos directa ou indirectamente na maior parte das *medições*, abrangendo um grande número de aplicações. Estão igualmente presentes no controlo e inspecção das várias fases dos processos de produção e de montagem de dispositivos e de equipamentos, na *calibração* de *instrumentos de medição*, na investigação e no desenvolvimento tecnológico e científico, bem como na *calibração* dos próprios blocos padrão.

Os blocos padrão são compostos por um conjunto de características ligadas à forma, ao material e à construção, que os distinguem de outros *padrões*. Assim, são *padrões* com a forma de um paralelepípedo (Figura 1.2). São constituídos por material de alta qualidade resistente à corrosão, com boa estabilidade dimensional, com coeficiente de expansão térmico próximo do dos materiais dos elementos com que interagem. Têm elevada exactidão dimensional e geométrica (comprimento, *paralelismo* e *planeza*) bem como um bom acabamento superficial que garanta uma boa aderência a outros blocos padrão.



Figura 1.2 – Exemplos de blocos padrão de aço de alta qualidade

É, portanto, um *padrão* com características metrológicas especiais que garante, através da sua *calibração*, a relação a referências determinadas, geralmente a *padrões nacionais* ou *internacionais*, por intermédio de uma cadeia ininterrupta de comparações, com inerente estimativa da *incerteza*.

Existem várias normas internacionais que definem as características e os métodos de *calibração* dos blocos. Neste trabalho vão ser referidos, em particular, os blocos padrão da norma ISO 3650 [4]. A norma classifica os blocos padrão em 4 *graus* (K, 0, 1 e 2). Os *graus* entendem-se como determinadas qualidades (ou graus de exactidão) exigidas na fabricação e referentes aos valores das tolerâncias dimensionais e geométricas. Note-se que à tolerância de menor valor corresponde a exactidão mais elevada [5]. Os blocos padrão de *grau* 0 a 2, juntamente com os blocos padrão *grau* K (ditos “para *calibração*”), oferecem um leque diversificado de opções de utilização, permitindo cobrir as necessidades e exigências dos laboratórios de metrologia, dos centros de inspecção ou controlo e das oficinas. A escolha do *grau* dos blocos padrão depende da exactidão pretendida. Na maior parte das vezes, os blocos de *graus* 0 e K são destinados a laboratórios de metrologia, os de *grau* 1 (ou 2) aos serviços de controlo ou inspecção e os de *grau* 2 às oficinas.

Na Tabela 1.1 são apresentadas várias aplicações de acordo com o *grau* dos blocos padrão.

Tabela 1.1 – Blocos padrão norma ISO 3650 [4] – *grau* /aplicação

Classificação	Uso	Grau Norma ISO 3650	
Referenciação	Investigação tecnológica e científica <i>Calibração</i> de blocos padrão	K	
<i>Calibração</i>	<i>Calibração</i> de instrumentos de medição <i>Calibração</i> de blocos padrão	K	0
Inspeção	Inspeção de máquina, ferramentas, etc. Inspeção de instrumentos de medição	1	2
Produção	Fabrico de dispositivos Inspeção de instrumentos de medição Montagem de ferramentas de corte	2	1

1.2.1. Deterioração dos blocos padrão

As características dos *padrões* e dos equipamentos de *medição* estão em constante mutação tendo, em geral, a tendência para se degradarem. A deterioração altera a exactidão original e deve-se fundamentalmente à falta de estabilidade dimensional do material de que são feitos,

ao desgaste provocado pelo contacto físico com outras superfícies (consequência da sua utilização regular), às condições ambientais (humidade, atmosfera corrosiva ou abrasiva, pó, etc.) e à degradação decorrente do armazenamento e manuseamento (corrosão, mossas, riscos, etc.). Todas estas razões influenciam a conservação do *grau* dos blocos, tornando muito complexa a quantificação e a previsão do tempo em que se manterão intactas as suas características originais. Os métodos utilizados para determinar ou modificar os intervalos de confirmação metrológica devem ser descritos em procedimentos documentados. Estes intervalos devem ser revistos e ajustados quando necessário, de modo a assegurar a contínua conformidade com os requisitos metrológicos especificados [3]. O intervalo de confirmação metrológica dos blocos padrão depende de dois factores: do *grau* dos blocos, que é conhecido, e do *grau* de deterioração, que pode ser previsto tendo em conta as circunstâncias de utilização dos blocos. A literatura dá orientações sobre o intervalo mais adequado entre *calibrações*, tomando em conta os factores de necessidade de *calibração*. Mas a melhor forma de o determinar ou reajustar será, se tal for possível, o recurso ao histórico das próprias *calibrações* [3].

1.2.2. Métodos de calibração

Na *calibração* dos blocos padrão existem 2 métodos: o método absoluto e método diferencial. No *método de medição* absoluto as dimensões do bloco padrão são vulgarmente obtidas por medição interferométrica (Figura 1.3).



Figura 1.3 – Sistema baseado no método absoluto: interferómetro LASER

No método diferencial, o comprimento do bloco padrão é medido por comparação com um bloco padrão de referência de comprimento conhecido. Para realizar as medições

comparativas utilizam-se comparadores electrónicos, constituídos por 2 *transdutores* de deslocamento do tipo LVDT e um dispositivo indicador, sendo este procedimento habitualmente manual.

Na Figura 1.4 pode ver-se um sistema baseado no método diferencial e um esquema onde se observa com detalhe o modo de comparação e medição dos dois blocos. O esquema demonstra de uma forma simplificada a *medição* pelo método diferencial. O LVDT superior e inferior estão alinhados simetricamente segundo o mesmo eixo e posicionados de modo a comparar os dois blocos padrão (o de referência e o bloco a calibrar).

O comprimento do bloco padrão, L_x , é calculado somando a diferença lida no dispositivo indicador do *sistema de medição*, ΔL , ao *valor convencionalmente verdadeiro* do bloco padrão de referência, L_R , sendo determinado pela equação (1.1).

$$L_x = L_R + \Delta L \quad (1.1)$$

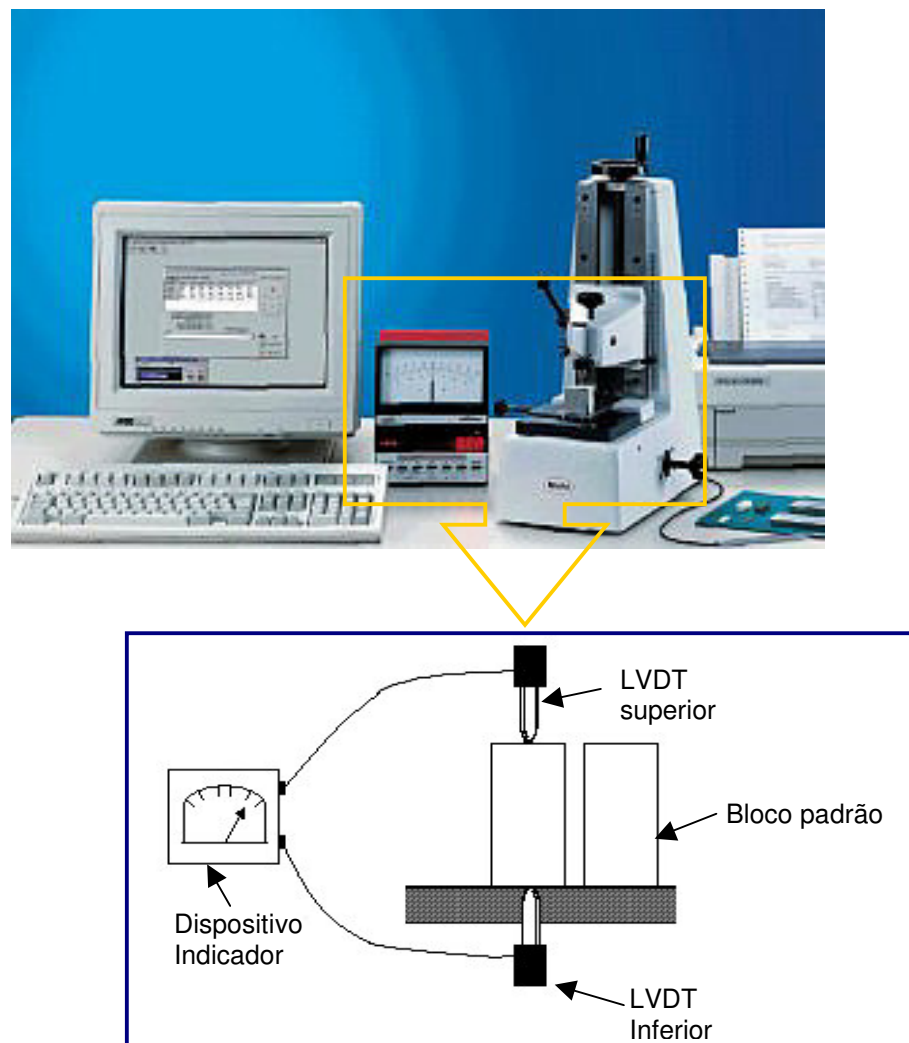


Figura 1.4 – Sistema baseado no método diferencial

1.3. Calibração de blocos padrão

O conjunto de operações que estabelecem, em condições especificadas, a relação entre o bloco de referência e o bloco padrão é assegurado no Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM) por dois sistemas de *calibração* de blocos padrão, ambos baseados no método diferencial.

Os *sistemas de medição* no CATIM são idênticos no *método de medição*, distinguindo-se pelo nível de intervenção do operador no procedimento de *calibração*: num dos casos, a intervenção do operador é totalmente manual, sendo no outro muito reduzida.

1.3.1. Sistema manual

O sistema manual (Figura 1.5) necessita da intervenção do técnico em todas as operações envolvidas no procedimento de *calibração*.

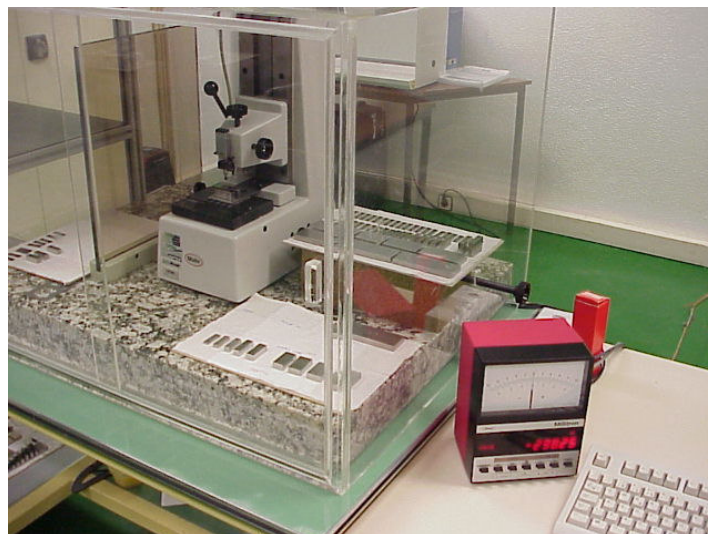


Figura 1.5 – Sistema manual de *calibração* de blocos padrão

A colocação dos blocos no *escantilhão*, o transporte para as posições de *calibração* e a leitura da diferença de comprimento entre os blocos são efectuados manualmente.

Nas Figura 1.6a e 1.6b pode ver-se a forma como se colocam os blocos padrão no *escantilhão*. O posicionamento (*escantilhão* e blocos) é feito por intermédio de um manípulo que desloca um carro linear, Figura 1.6c. Na Figura 1.6d pode ver-se o bloco padrão numa das posições de *calibração*.

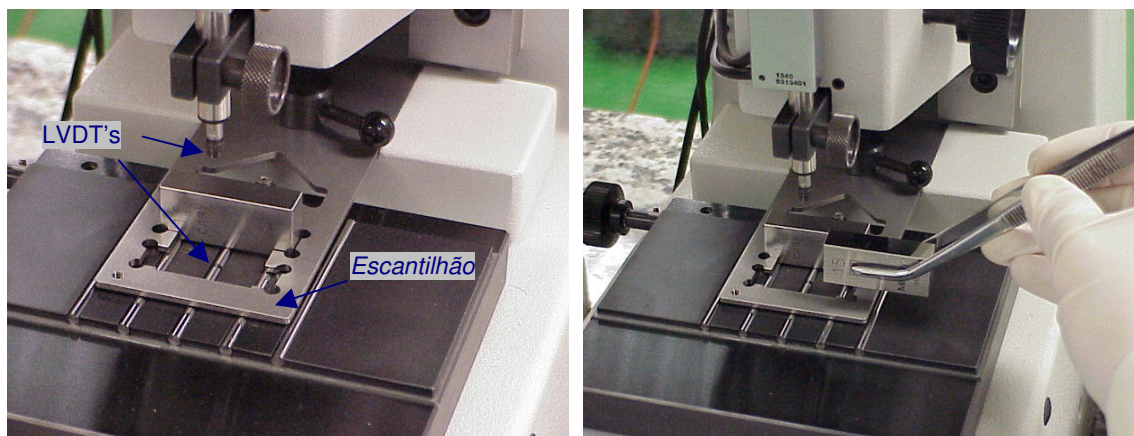
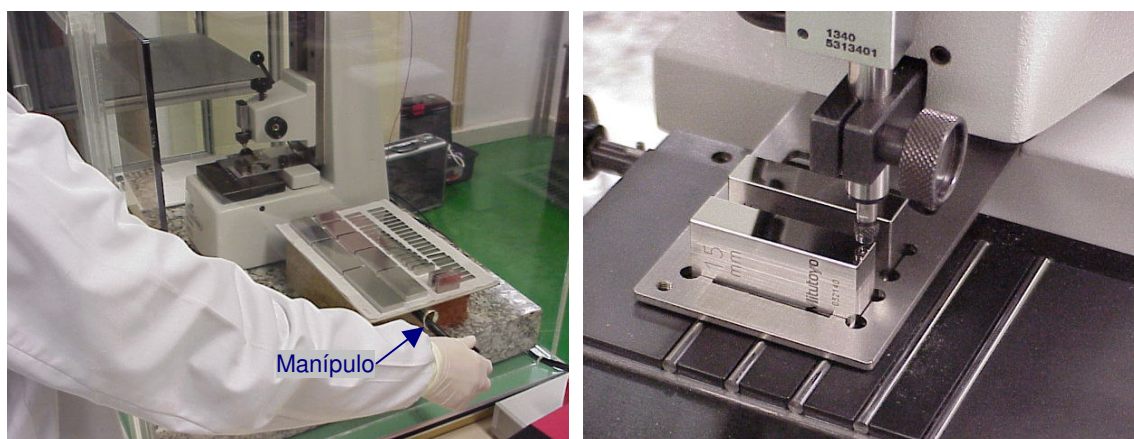


Figura 1.6 a) e b) – Colocação de blocos padrão

Figura 1.6 c) e d) – Posicionamento dos blocos padrão nas posições de *calibração*

1.3.2. Sistema automático

O sistema automático (Figura 1.7) distingue-se do manual porque o posicionamento dos blocos padrão, o procedimento de *calibração* e a aquisição dos valores medidos são efectuados automaticamente.

Neste sistema existe um sistema mecânica de movimentação que transporta e posiciona os blocos padrão nas posições de *calibração*. Estas tarefas (de transporte e de posicionamento) são garantidas mecanicamente por intermédio do movimento de vários elementos: o carrossel, o braço posicionador e a mesa de posicionamento de precisão (Figura 1.8). Neste caso, existem vários *escantilhões* que permitem, cada um, posicionar 4 blocos: 2 para calibrar e 2 de referência (Figura 1.8).

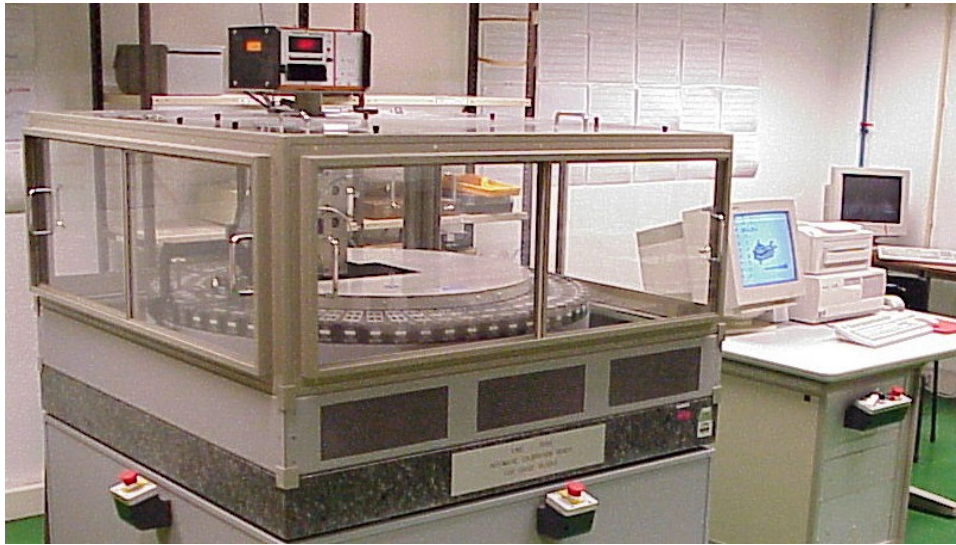


Figura 1.7 – Sistema automático de calibrar blocos padrão

No sistema automático, a colocação dos blocos padrão nos respectivos *escantilhões* no carrossel é efectuada manualmente, tal como no sistema manual. Este sistema é ideal para *calibração* de um número elevado de blocos padrão, dado que a colocação é feita uma única vez, e o carrossel, juntamente com os *escantilhões*, o braço posicionador e a mesa de posicionamento de precisão, garantem o posicionamento correcto para *calibração* (Figura 1.8).

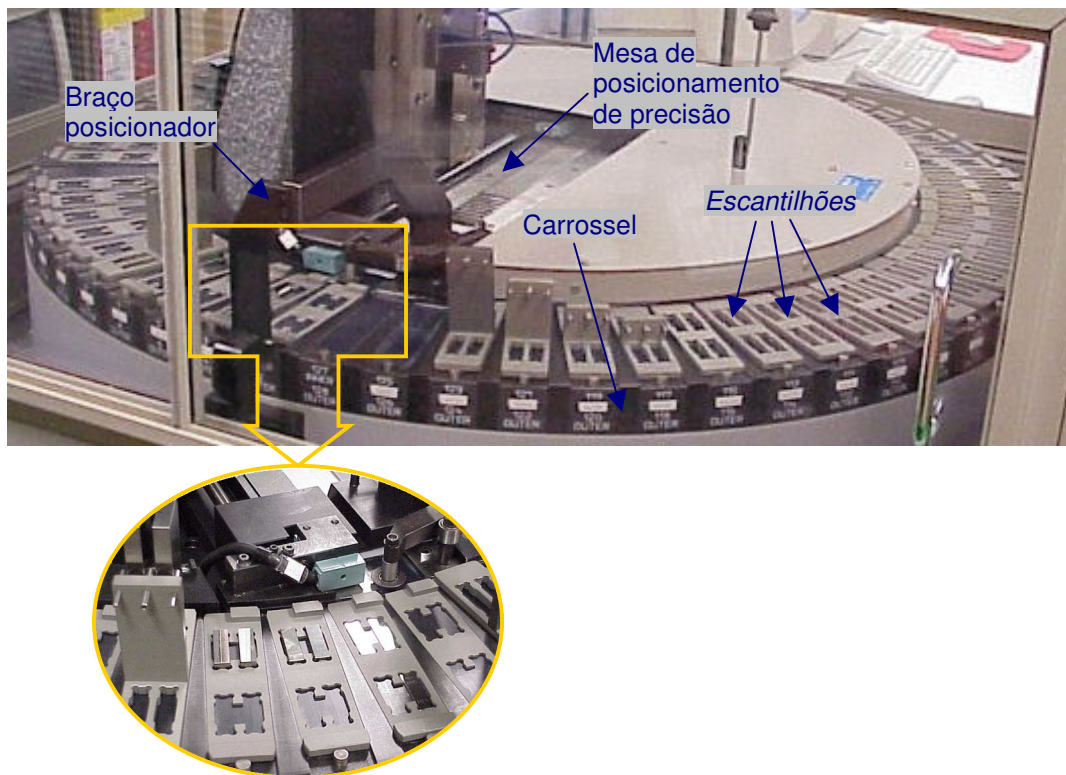


Figura 1.8 – Colocação dos blocos nos *escantilhões*

O posicionamento dos blocos é garantido pelo carrossel, pelo braço posicionador (dispositivo que transporta os *escantilhões* até à mesa de posicionamento de precisão) e pela mesa de posicionamento de precisão. Através de um movimento angular, o carrossel posiciona o *escantilhão* no local onde o braço posicionador é accionado. Após o accionamento do braço posicionador, são movimentados linearmente (movimento radial em relação ao carrossel) até à mesa de posicionamento de precisão. Os movimentos de posicionamento dos blocos para as zonas exactas de *calibração* são assegurados pela mesa de posicionamento de precisão por meio de dois movimentos lineares perpendiculares entre si.

O sistema automático foi criado para otimizar a *calibração* de caixas de blocos padrão garantindo uma utilização rentável com a *exactidão* necessária e a máxima rapidez. No entanto, foram detectadas várias limitações neste sistema que levaram ao planeamento cuidadoso de diversas intervenções com o objectivo de melhorar a segurança do equipamento e aumentar a qualidade da *calibração*.

Ao nível da segurança, a máquina revelou várias deficiências, das quais se destaca o facto de não contemplar protecção contra situações de colisões entre os blocos padrão e o LVDT superior, o que põe em risco vários dos seus componentes e, consequentemente, o seu bom funcionamento.

A aquisição e monitorização de condições ambientais fundamentais (temperatura e humidade) no ambiente de trabalho (zona de trabalho), que interferem no cálculo da incerteza das *calibrações* e conservação

dos equipamentos, não era feita de forma automática, sendo lida pelo utilizador e introduzida posteriormente a fim de permitir os cálculos necessários para a elaboração do certificado.

O tratamento dos dados de *calibração* era realizado manualmente. Com efeito, o sistema produzia um ficheiro de dados, em formato MS-DOS, que era posteriormente introduzido de forma manual numa folha de cálculo, juntamente com as condições ambientais, para finalmente ser produzido o respectivo certificado de *calibração*. Esta tarefa de introdução de dados gerava um considerável consumo de tempo e de erros humanos.

O controlo das funções e sequências de posicionamento, bem como o armazenar da informação dos blocos padrão de referência e dos dados das *medições*, é feito pelo software da máquina. Para tornar o sistema automático de *calibração* de blocos padrão (SACBP) num sistema aberto a nível do controlo, da gestão da informação e de alterações futuras de parâmetros normativos identificou-se como interessante a substituição do actual sistema de controlo. Contudo devido à sua complexidade e à paragem obrigatória do sistema (necessariamente prolongada), não irá ser implementada nesta dissertação.

1.4. Objectivos – Proposta de solução

Esta dissertação descreve as várias acções concebidas e implementadas para a melhoria do desempenho e da segurança do sistema automático de *calibração* de blocos padrão (SACBP):

- a) para melhorar o nível da segurança do sistema foi concebido um sistema que dá a informação sobre a incorrecta introdução de blocos padrão. Com esta acção pretende-se prevenir o dano dos elementos mais sensíveis, como o LVDT superior e vários acessórios de posicionamento (*escantilhões*, guias...), procurando evitar situações de acidente ocorridas no passado;
- b) para conhecimento das condições ambientais, temperatura e humidade, criou-se um sistema capaz de garantir as necessidades impostas para a *medição* das mesmas e, desenvolveu-se uma aplicação amigável com o utilizador para as monitorizar e registar;
- c) para o processamento automático dos dados de calibração e elaboração do respectivo certificado desenvolveu-se uma solução para a aquisição dos valores de temperatura e humidade do ambiente de trabalho da máquina e para o tratamento de dados de *calibração* que permita a implementação de um procedimento sistemático e automático com grandes vantagens em termos de tempo despendido, ausência de erros humanos e melhoria da *incerteza expandida* associada;

Serão, também, analisados temas importantes ligados à *calibração* de blocos padrão:

- d) para o sistema de calibração automático de blocos padrão (SACBP) será feita a descrição e apresentado o procedimento de *calibração*, segundo a norma ISO 3560 [4];
- e) para a incerteza de medição serão apresentados todos os conceitos e informações para o seu cálculo e apresentados os resultados dos valores obtidos da *incerteza expandida de medição*, contabilizando a contribuição das implementações para a melhoria do desempenho do SACBP.

1.5. Descrição resumida do trabalho

Esta dissertação é constituída por vários capítulos que descrevem os conceitos, a concepção e a implementação das soluções dos problemas abordados nos pontos 1.3 e 1.4.

O capítulo 1 procura introduzir um conjunto vasto de conceitos, situar o problema e apontar resumidamente as acções que nortearam o trabalho. O capítulo 2 apresenta o procedimento de *calibração* segundo a norma ISO 3650 [4] e a descrição do sistema automático de *calibração* de blocos padrão. O capítulo 3 indica a solução adoptada para resolver os problemas de segurança, enquanto o capítulo 4 descreve o modo como foi implementado o *sistema de medição* dos parâmetros ambientais. No capítulo 5 é descrita a interface desenvolvida para a monitorização de parâmetros ambientais e para o processamento dos dados de medição, que permite a elaboração automática dos certificados. No capítulo 6 é abordado o tema das *incertezas nas medições* e descrito o modelo de cálculo matemático da *incerteza expandida de medição*. No capítulo 7 apresentam-se os aspectos sobre a viabilidade de substituição do sistema de controlo inerente ao equipamento, de modo a permitir a implementação de um sistema aberto, com flexibilidade para alterações futuras de parâmetros normativos. Finalmente, no capítulo 8 apresentam-se as conclusões.

2. Sistema automático de calibração de blocos padrão

O sistema automático de *calibração* de blocos padrão equipa o laboratório de Metrologia Dimensional do CATIM (Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica, no Porto) desde 1995. Veio permitir automatizar algumas das tarefas do procedimento de calibração dos blocos padrão.

Este sistema foi concebido inicialmente pelo LNE em Paris, França. Seguidamente, durante uma década, foi optimizado e desenvolvido pela empresa Tesa Metrology Ltd. (TML) em Telford, Inglaterra. A designação original era MACCE (“Machine Automatique a Controler les Cales Etalons”), de origem francesa. Actualmente este sistema é designado, no CATIM, por SACBP (Sistema Automático de Calibração de Blocos Padrão).

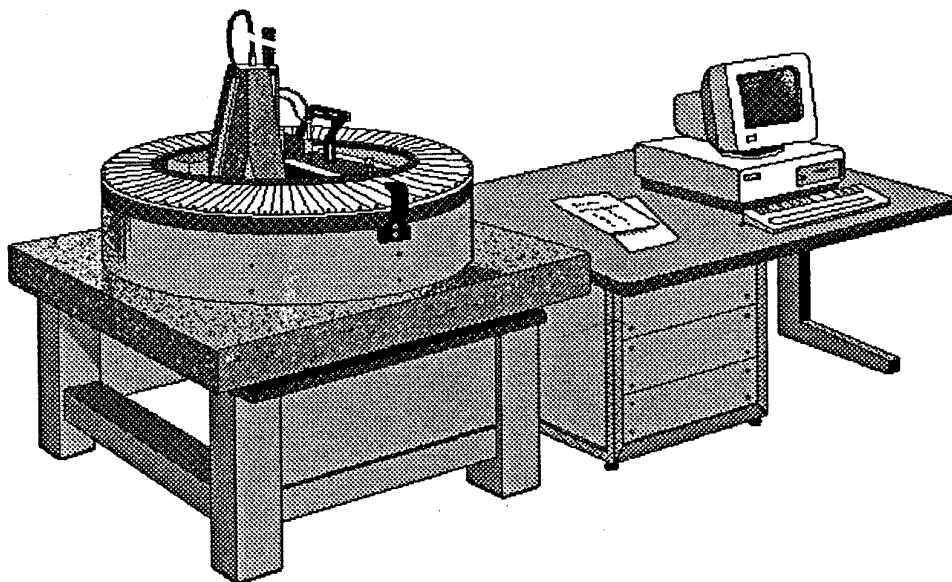


Figura 2.1 – Design original do sistema SACBP

O sistema SACBP é um sistema vocacionado para a *calibração* de caixas de blocos padrão (Figura 2.2), representando um volume de encomendas de 90% no total de serviços prestados no âmbito das calibrações de blocos padrão do Laboratório de Metrologia Dimensional. Em relação à totalidade das calibrações, a calibração de blocos padrão representa, aproximadamente, 1/8 da facturação anual desta área da Metrologia do CATIM.



Figura 2.2 – Caixa de blocos padrão

2.1. Procedimento de calibração - Norma ISO 3650

A configuração e programação do sistema SACBP garantem na integridade as *medições*, de forma a respeitar os procedimentos de calibrações segundo a norma ISO 3650 [4], dentro dos requisitos exigidos pela directiva EAL-G21 [7]. O documento EAL-G21 [7] estabelece os requisitos mínimos e fornece orientações sobre o procedimento de calibração de sistemas de calibração de blocos padrão (idênticos ao sistema SACBP) usados em laboratórios acreditados.

2.1.1. Fases da calibração

Devido à deterioração dos blocos padrão, torna-se necessário o controlo periódico das características metrológicas (comprimento e *planeza*) dos mesmos. Considerando a grande importância do conhecimento do *grau* dos blocos padrão, a sua *calibração* deve seguir práticas estabelecidas que compreendem quatro tarefas: inspecção visual, preparação, inspecção geométrica e inspecção dimensional.

Inspeção visual

A inspeção visual tem como finalidade examinar a possível presença de riscos, mossas, pontos de corrosão ou outros defeitos semelhantes causados pela utilização e pelo manuseamento. Estes defeitos podem ser detectados com o auxílio de planos ópticos, que também servem para medir a *planeza* das faces de medição (faces de utilização e que definem as suas características: comprimento e *planeza*). Alguns destes defeitos, os menores, podem ser eliminados por polimento usando pedras de grãos finos feitas em rocha natural semelhantes às pedras de “Arkansas”, ou granito preto, operação realizada como indica a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Utilização de pedra de “Arkansas” para remover pequenos defeitos

Preparação

Designa-se por preparação a limpeza e a estabilização da temperatura dos blocos padrão. Na limpeza é necessário ter atenção especial às faces de medição. Para tal, aconselha-se a utilização de papel, solvente, pincel com emissão de ar, pinças e luvas de plástico e/ou de algodão. O papel é utilizado para eliminar os óleos antioxidantes, marcas, pó, etc. Os solventes ajudam a remover o óleo de protecção ou outras marcas. São recomendados os solventes altamente voláteis como, por exemplo, a benzina, sendo necessário cuidado com a sua toxicidade. O pincel é muito usado para remover o pó acumulado nas faces de medição. As pinças são um bom auxiliador na limpeza dos blocos mais pequenos e a utilização de luvas no manuseio dos blocos previne a oxidação. Após a fase de limpeza, os blocos devem ser colocados aos pares (bloco + bloco de referência) durante tempo suficiente para uma perfeita estabilização térmica. Deve ser prestada particular atenção às variações de temperatura junto dos blocos. Na manipulação devem ser utilizadas pinças adequadas (com pontas protegidas de material elastómero) e/ou luvas, para minimizar a influência de contacto na sua expansão térmica.

Inspecção dimensional e geométrica

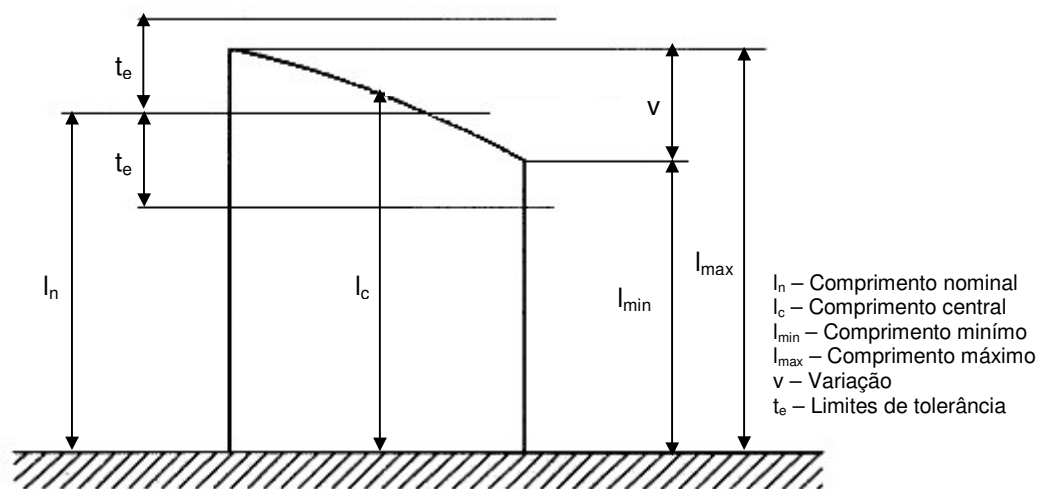
O procedimento para a inspecção dimensional e geométrica, que se vai descrever, é baseado na norma ISO 3650 [4]. Esta norma fixa as condições técnicas bem como as tolerâncias a adoptar para blocos padrão de secção rectangular e de *valor nominal*, I_n , entre 0,5 a 1000 mm e de *grau* 0, 1 e 2.

2.1.2. Definições

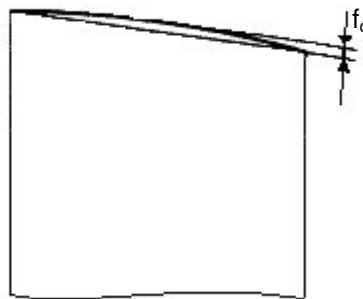
Os blocos têm de cumprir várias especificações metrológicas, isto é, tanto as faces de medição como as faces laterais devem estar dentro das tolerâncias especificadas pela norma. Há características que devem ser tidas em conta unicamente na construção dos blocos, enquanto outras têm que ser controladas periodicamente e tidas em atenção nos processos de *calibração*.

A *planeza*, o *paralelismo*, a perpendicularidade das faces laterais e o tipo de arestas entre estas são as características que devem ser tidas em conta, unicamente, na altura da construção dos blocos padrão.

Existem outras características cujo controlo, para além de exercido na construção, tem que ser igualmente feito periodicamente; são objecto do processo de *calibração* e estão ligadas às faces de medição. As Figura 2.4 e a Figura 2.5 mostram quais são: comprimento do ponto central (I_c), comprimento máximo (I_{max}), comprimento mínimo (I_{min}), variação (v) e *planeza* (f_d).

Figura 2.4 – Parâmetros a controlar na *calibração*

Entende-se por *planeza* da face de medição do bloco padrão (f_d) a distância mínima entre dois planos paralelos que contenham todos os pontos que dão origem ao plano formado pela face de medição (Figura 2.5) [4].

Figura 2.5 – *Planeza* da face de medição

2.1.3. Unidade de medição, rastreabilidade e condições de referência

De acordo com a norma ISO 3650 [4], a unidade de comprimento utilizada é o metro. O metro é definido como sendo o comprimento percorrido pela luz, no vazio, no intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ do segundo (17th General Conference of Weights and Measure, 1983).

A *rastreabilidade* do comprimento dos blocos padrão é assegurada por *padrões nacionais* e *padrões internacionais*. As *medições* são obtidas comparando os blocos padrão com os blocos

padrão de referência, calibrados por interferometria através de comprimentos de onda padrão apropriados.

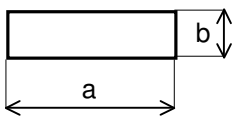
As *condições de referência* de trabalho impostas são a temperatura e a pressão. O *valor nominal* e comprimentos do bloco padrão medidos devem respeitar a temperatura de referência de 20°C e pressão normalizada de 1,01325 bar. No entanto, a influência da pressão pode ser ignorada quando se trabalha à pressão atmosférica normal [4].

A *calibração* de blocos padrão até 100 mm deve ser realizada com as faces de medição colocadas na posição horizontal.

2.1.4. Dimensões e propriedades

Segundo a norma ISO 3650 [4], as dimensões gerais da secção dos blocos padrão deverão ser as descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Dimensões gerais da secção dos blocos padrão

Secção blocos padrão	Comprimento nominal, l_n (mm)	a (mm)		b (mm)	
		Nominal	Tolerância		
	$0,5 \leq l_n \leq 10$	30	0	9	-0,05
	$10 < l_n \leq 1000$	35	$\begin{matrix} a \\ -0,3 \end{matrix}$		$\begin{matrix} a \\ -0,20 \end{matrix}$

No fabrico dos blocos padrão deve ser utilizado aço de boa qualidade ou outro material com resistência ao uso capaz de apresentar um bom acabamento superficial e uma boa estabilidade dimensional. A alteração máxima do comprimento por ano deverá ser menor que a indicada na Tabela 2.2, sem ter em conta a exposição a temperaturas excepcionais, vibrações, choques, campos magnéticos ou forças mecânicas [4].

Tabela 2.2 – Variação máxima do comprimento por ano

<i>Grau</i>	Variação máxima do comprimento por ano
K	$\pm (0,02 + 0,25 \times 10^{-6} \times l_n) \mu\text{m}$
0	
1	$\pm (0,05 + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n) \mu\text{m}$
2	
Nota – l_n em milímetros	

Geralmente os blocos são em aço, apresentando um coeficiente de expansão térmico de $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para temperatura de 10 °C a 30 °C. O aço das faces de medição deve ter uma dureza Vickers não inferior a 800 HV 0,5 (norma ISO 6507-1 [6]) [4].

Todos os blocos devem estar identificados com o *valor nominal* e *grau* correspondente.

2.1.5. Determinação dos comprimentos

Os blocos padrão de referência e o SACBP são os principais equipamentos utilizados para a *calibração* dos blocos padrão: controlo de comprimentos do ponto central, do comprimento máximo, do comprimento mínimo e controlo da variação.

Na medição do comprimento, os blocos padrão são colocados na posição do carrossel correspondente à sua dimensão nominal, conforme mostrado na Figura 2.6.

Para manter os blocos padrão na sua posição são usados *escantilhões*. Estes são acessórios que têm como função garantir o posicionamento correcto dos blocos padrão no *sistema de medição* em todas as fases de *calibração*.

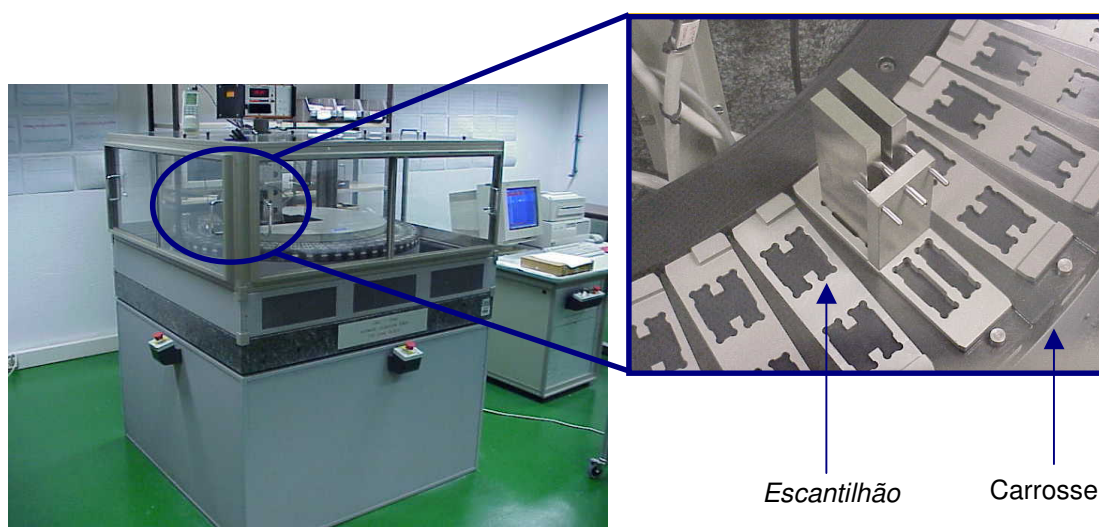


Figura 2.6 – Colocação dos blocos padrão no carrossel no respectivo *escantilhão*

O *princípio de medição* é baseado no *método de medição* diferencial, o qual consiste na comparação do ponto central do bloco padrão de referência com o bloco padrão a calibrar. A comparação é efectuada por intermédio dos LVDT's colocados no plano indicado na Figura 2.7, sendo a diferença medida mostrada no visor do dispositivo de medição (Figura 2.8).

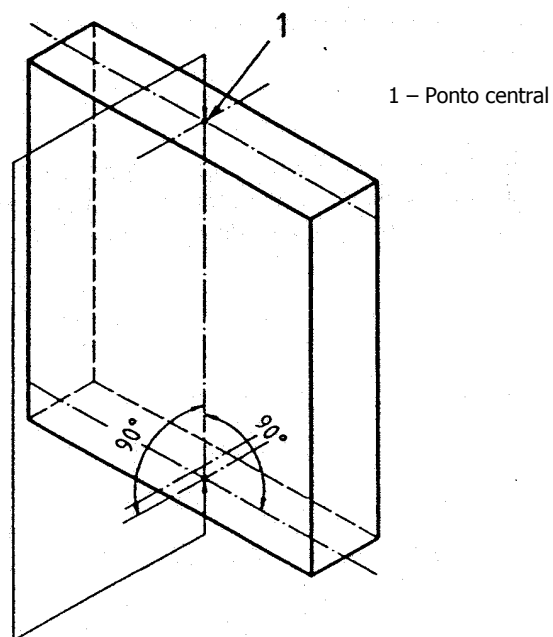


Figura 2.7 – Medição do comprimento central por comparação tomando a distância segundo a normal que passa pelos pontos centrais das faces de medição

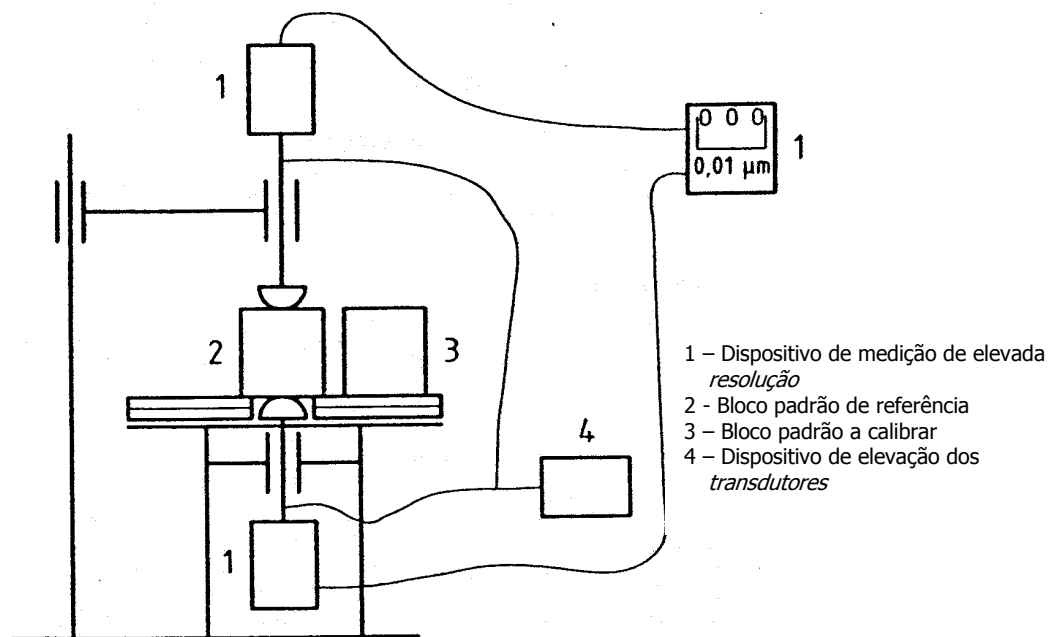


Figura 2.8 – Comparador de blocos padrão de comprimento nominal até 100mm

Na Figura 2.9 vê-se um dos instantes em que o sistema SACBP faz a *medição* dum bloco padrão, de acordo com o método esquematizado na Figura 2.8.

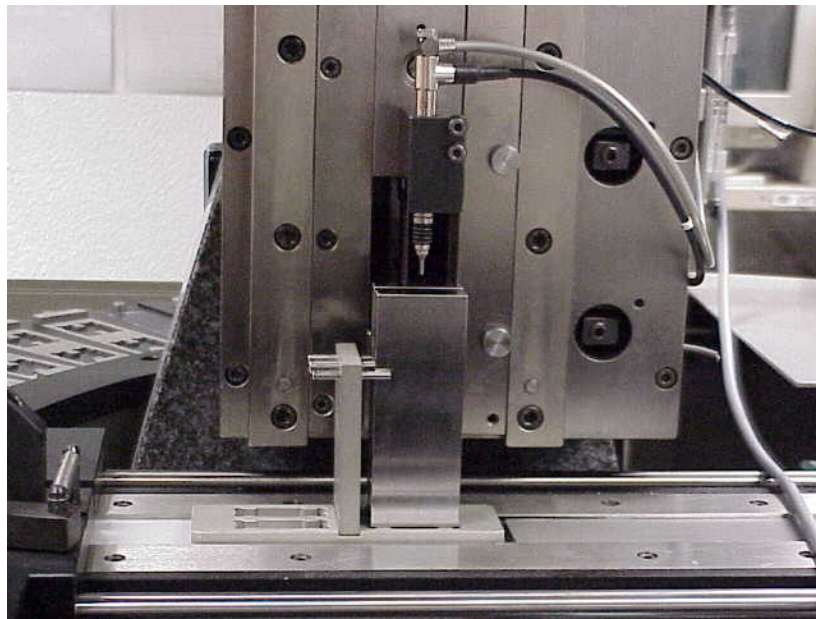


Figura 2.9 – Medição no sistema SACBP

Deste modo, são determinados o valor do ponto central e a variação do comprimento de acordo com o método que se descreve seguidamente. A variação de comprimento é determinada pela diferença entre o comprimento máximo e mínimo dos 5 pontos medidos no bloco, um dos quais central e os restantes quatro distribuídos por cada um dos quatro cantos (aproximadamente a 1,5mm das faces laterais do bloco), como esquematizado na Figura 2.10 [4].

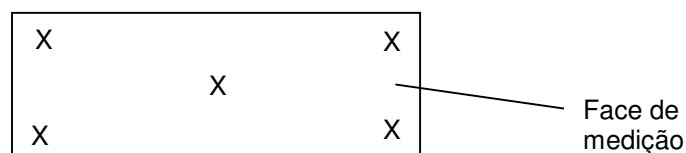


Figura 2.10 – Os 5 pontos submetidos a medição

É necessário ter em conta factores que podem influenciar os valores obtidos: os desvios do dispositivo de medição, a diferença da temperatura em relação à temperatura de referência e, se for o caso, relativamente aos diferentes coeficientes de expansão térmicos dos blocos padrão comparados. Estes factores vão ser contabilizados para o cálculo da estimativa da incerteza que, por sua vez, vai permitir caracterizar uma estimativa possível do erro associado às medições efectuadas. O estudo e cálculo da estimativa da incerteza vão ser apresentados no capítulo 6.

2.1.6. Determinação da planeza

O plano óptico e uma fonte de luz monocromática são os principais equipamentos utilizados para controlar a *planeza*. A *medição* da *planeza* é efectuada sob uma luz monocromática. Sobre cada uma das superfícies de medição do bloco coloca-se o plano óptico (com diâmetro suficiente de forma a cobrir toda a face). Exerce-se manualmente uma ligeira pressão sobre o plano óptico por forma a retirar a camada de ar existente entre as duas superfícies em contacto. Seguidamente, aplica-se uma ligeira pressão sobre uma das extremidades do plano, dando origem ao aparecimento de franjas de interferência (Figura 2.11).

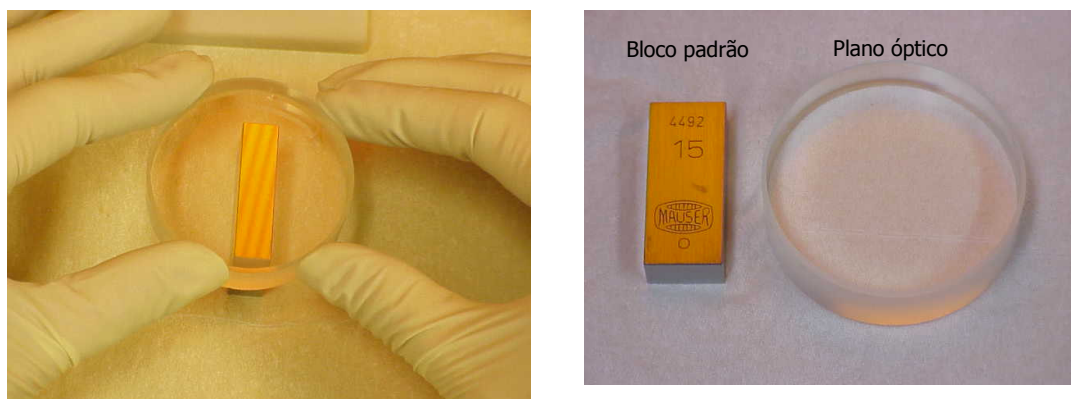


Figura 2.11 – Exemplo de *medição* da *planeza* dos blocos

A curvatura das franjas é usada para determinar o valor da *planeza* das faces de medição. O resultado da *planeza* é determinado com a ajuda da carta de interpretação de *planeza* (Anexo A) [8].

2.1.7. Tolerâncias

Depois de determinados os comprimentos e a *planeza*, estes deverão ser comparados com as tolerâncias e erros máximos admissíveis (Anexo A) para determinação do *grau dos blocos padrão*. Poder-se-á, então, verificar se as características originais (*planeza* e comprimentos) foram mantidas e, consequentemente, se os blocos padrão são adequados ao uso a que estão destinados.

2.2. Descrição do sistema

O sistema SACBP é constituído por um sistema mecânica de movimentação montado numa plano de granito que lhe garante estabilidade (Figura 2.12). No sistema mecânica de movimentação está montado um carrossel com *escantilhões* (Figura 2.13) para posicionar 4 blocos: 2 para calibrar e 2 de referência.



Figura 2.12 – Aspecto geral do sistema SACBP

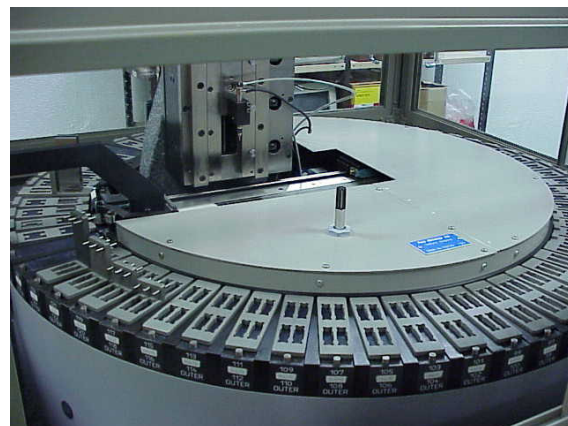


Figura 2.13 – Carrossel e *escantilhões* do sistema SACBP

O sistema SACBP pode calibrar caixas com um número máximo de 122 unidades e com valores nominais compreendidos entre 0,5 e 100 mm. O transporte e posicionamento dos blocos para as várias posições de *calibração* são garantidos mecanicamente pela rotação do carrossel, pelo movimento linear do braço posicionador e pelo deslocamento, em dois eixos (X e Y), da mesa de posicionamento de precisão (Figura 2.14). O posicionamento dos eixos X e Y é feito por intermédio de 2 parafusos sem fim, accionados por 2 motores passo-a-passo.

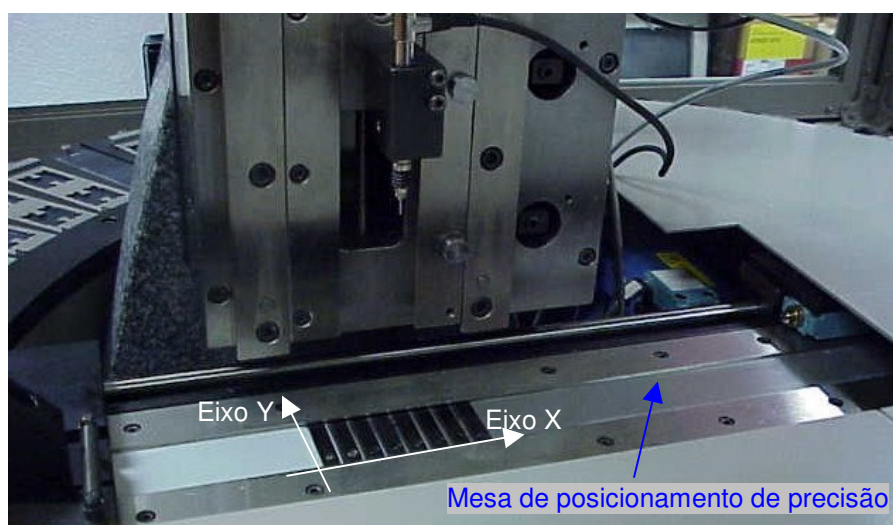


Figura 2.14 – Mesa de posicionamento de precisão

O movimento vertical do LVDT superior é realizado numa coluna vertical (Figura 2.15). A sua movimentação é efectuada por intermédio de um motor passo-a-passo com elevada exactidão de posicionamento. A fixação do LVDT na cota de medição é garantida automaticamente através de um travão.

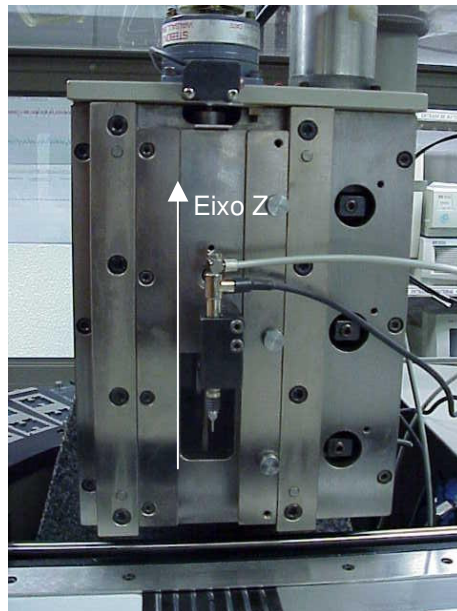


Figura 2.15 – Coluna vertical

A banca de controlo (Figura 2.16) é constituída por computador, um quadro eléctrico, uma unidade de microposicionamento 3D de motores passo-a-passo “Parker Digiplan”, controlados pela carta AT6400 da “Parker Compumotor”.



Figura 2.16 – Banca de controlo

No corpo da máquina estão alojados os seguintes componentes: o motor do carrossel, a unidade de medição “TESAMODUL”, a bomba de vácuo e o respectivo circuito para recolha dos LVDT’s, 4 motores passo-a-passo, o interruptor do motor do carrossel, 6 fins de curso e 4 botoneiras de emergência.

A unidade de medição “TESAMODUL” é constituída por um dispositivo indicador e por dois LVDT’s (Figura 2.17 a Figura 2.19). O LVDT superior (Figura 2.18) está montado na coluna vertical e é responsável pelas *medições* nas faces superiores. O LVDT inferior (Figura 2.19) está fixo à mesa de posicionamento de precisão, para *medições* na face inferior dos blocos. A bomba de vácuo tem como função retrain os LVDT’s durante o transporte para posicionamento e no processo de *medição* dos blocos. A força de medição é de aproximadamente 1 N para a LVDT superior, e de 0,63 N para a inferior. As faces de contacto dos LVDT’s são de tungsténio com forma esférica.



Figura 2.17 – Dispositivo indicador da unidade de medição TESAMODUL

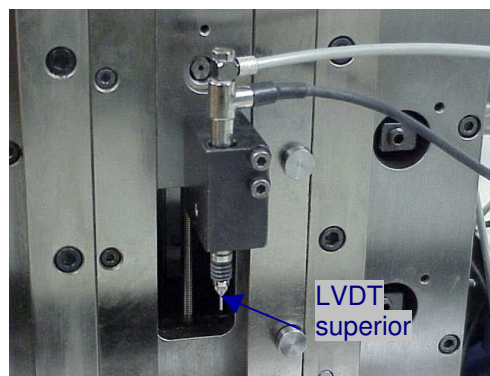


Figura 2.18 – LVDT superior móvel da coluna vertical

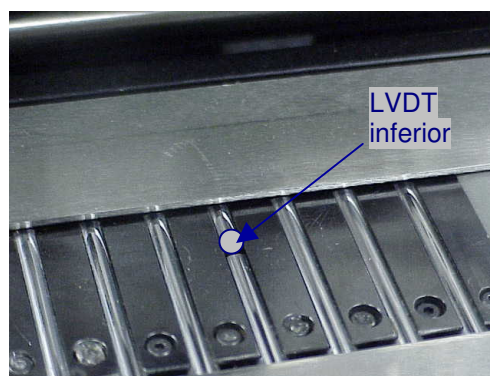


Figura 2.19 – LVDT inferior fixo na mesa de posicionamento

O dispositivo indicador tem boa estabilidade e elevada *resolução* ($0,01 \mu\text{m}$). O *sistema de medição* tem uma gama de nominal de $\pm 200 \mu\text{m}$, estando calibrado para uma gama de utilização de $\pm 10 \mu\text{m}$.

O software de origem do sistema SACBP destina-se a controlar as funções e sequências de posicionamento, bem como a armazenar a informação dos blocos padrão de referência e dados das *medições* já realizadas. A configuração dos parâmetros da unidade de medição “TESAMODUL”, o comando das cartas de controlo dos motores passa-a-passo e o procedimento de *calibração* são efectuados por software.

3. Sistema de segurança

Actualmente, a segurança dos equipamentos industriais é um aspecto muito importante no conjunto de características dos mesmos.

À segurança estão associadas duas perspectivas distintas: a de prevenção e a de protecção. A prevenção é vista como a forma de reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes. A protecção, como o meio de minimizar as consequências desses acidentes ou de situações que condicionem o bom funcionamento do equipamento.

O sistema SACBP contempla, de origem, alguns aspectos ligados à segurança, mas basicamente na perspectiva da protecção e não da prevenção. A Figura 3.1 mostra os elementos originais: a blindagem de protecção do carrossel, a chave de comando e os botões de emergência.

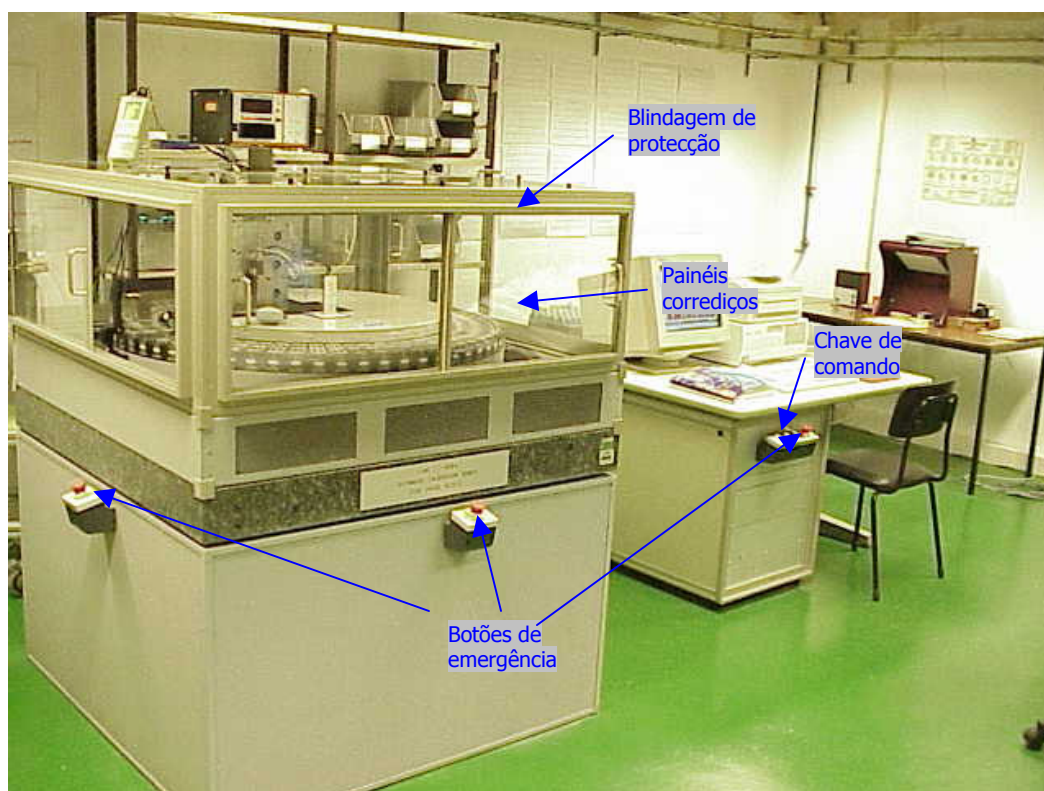


Figura 3.1 – Dispositivos de segurança de origem

A blindagem possui painéis corrediços que permitem o acesso ao carrossel para colocação dos blocos padrão e para limpeza. A sua principal função ao nível da segurança é evitar a colocação, dentro da máquina, de objectos estranhos ao funcionamento da mesma. A chave de comando permite colocar o sistema SACBP totalmente fora de serviço. Os botões de emergência, que estão estrategicamente colocados, permitem uma rápida intervenção para imobilização manual do sistema quando algo de anormal acontece que possa colocar em perigo o equipamento ou parte deste.

Estes aspectos de segurança não são suficientes e não eliminam a principal causa de acidentes no sistema SACBP, como se descreverá no ponto 3.1.

Embora neste sistema o risco para o operador seja reduzido, a eventualidade de uma colisão entre os blocos e um dos elementos de medição pode produzir avultados prejuízos.

Por este motivo, todas as alterações efectuadas a nível de segurança no sistema SACBP privilegiam a prevenção e, portanto, têm como principal objectivo diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes, seja qual for a natureza destes, optimizando o funcionamento do sistema SACBP.

3.1. Limitações do sistema de segurança de origem

Durante a utilização do sistema SACBP, aconteceram vários acidentes que danificaram alguns componentes, forçando a períodos de imobilização imprevistos e causando prejuízos associados à substituição dos mesmos bem como à consequente re-calibração do sistema.

A causa destes acidentes foi fundamentalmente a mesma: colocação errada de um bloco padrão. Como consequência, ocorreram colisões entre os blocos e os elementos do sistema (principalmente com o LVDT superior). De facto, as posições dos blocos padrão são previamente definidas por software. Se, por engano, o operador colocar no *escantilhão* um bloco padrão de dimensão superior, o sistema não consegue detectar esse erro. Para prevenir este tipo de falha foi implementada uma solução, a que se fará referência nos pontos 3.2 e 3.3. O posicionamento dos blocos padrão obedece a uma sequência lógica automática. O LVDT superior é posicionado em altura, de acordo com a informação pré definida (Figura 3.2a). De seguida, o braço posicionador transporta o *escantilhão* com os blocos padrão para a posição de *calibração*, conforme se mostra nas Figuras 3.2b e 3.2c.

A Figura 3.2d ilustra o resultado de uma colisão do LVDT superior com um bloco padrão.

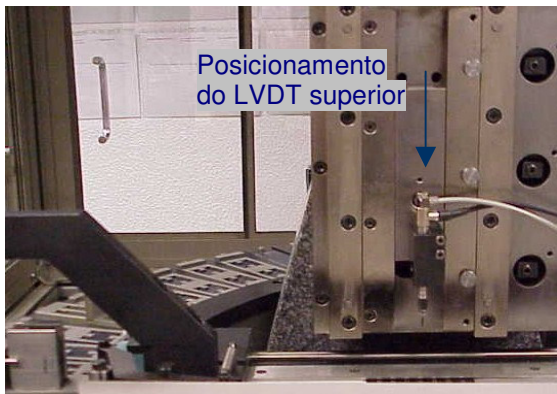


Figura 3.2 a) – Posicionamento do LVDT superior

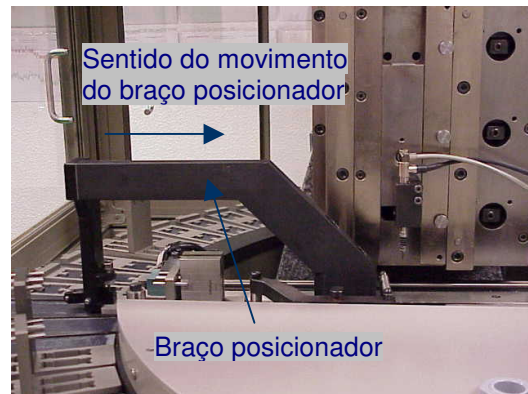
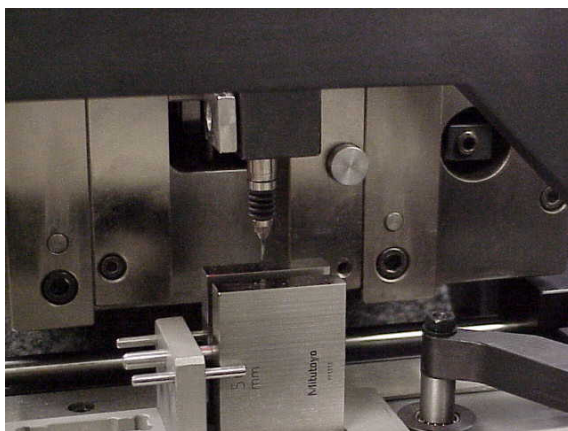
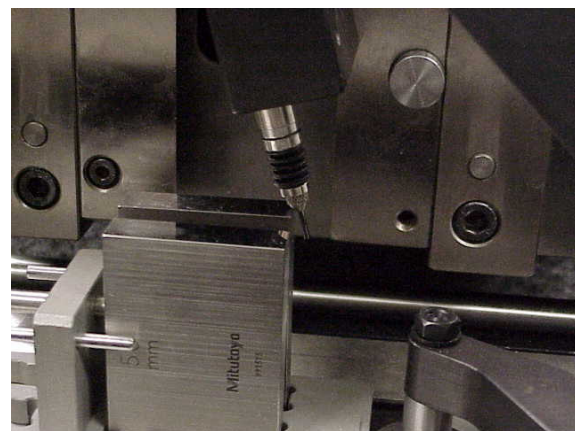
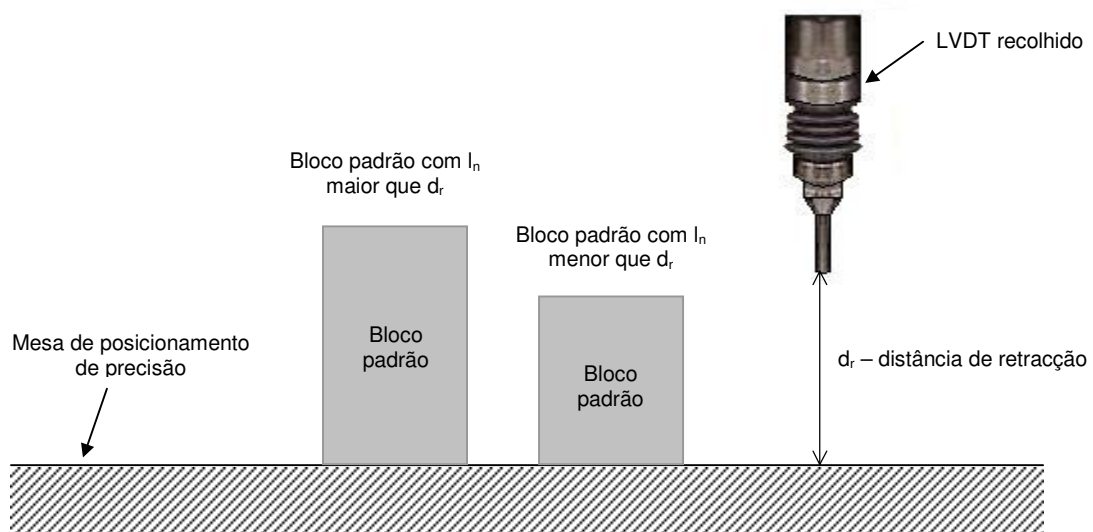
Figura 3.2 b) – Transporte do *escantilhão*Figura 3.2 c) – Posição de *calibração*

Figura 3.2 d) – Situação de colisão

Durante a operação de posicionamento, os LVDT's estão recolhidos. A colisão só acontece se o comprimento do bloco padrão, l_n , for superior à distância de retracção mecânica do LVDT superior, d_r (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Distância de retracção mecânica, d_r , do LVDT superior

3.2. Estratégia adoptada

A estratégia adoptada para dotar o sistema de capacidade de identificação de uma possível colocação errada dos blocos padrão, que possa originar a colisão com o LVDT superior, foi implementada através de um conjunto de dois detectores.

Dado que a aproximação do braço posicionador (Figura 3.2b) ao LVDT superior se faz sempre no mesmo sentido (do exterior do carrossel para a posição de *calibração*), torna-se necessário criar uma “barreira de protecção” situada à esquerda do LVDT, de modo a protegê-lo quando se encontra recolhido. A Figura 3.4 evidencia a protecção criada pela barreira óptica a implementar.

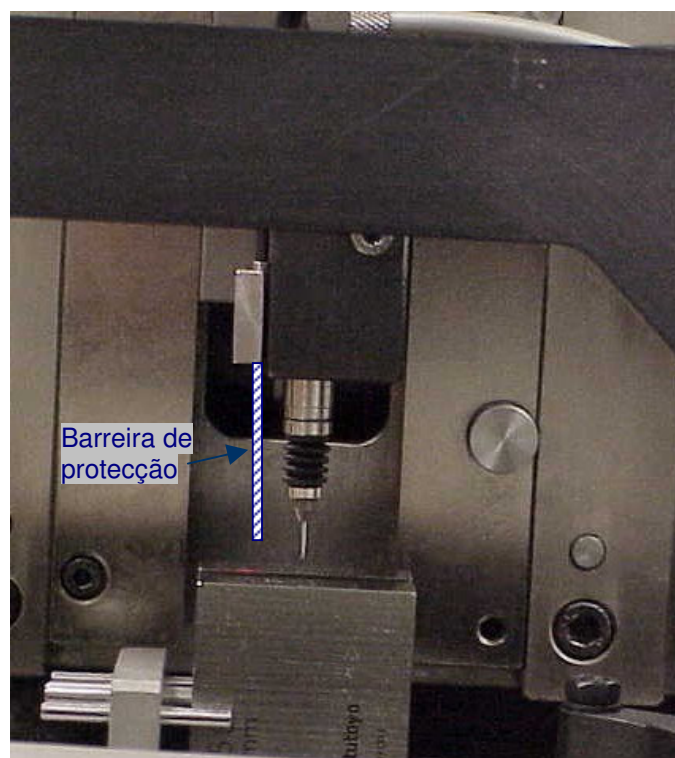


Figura 3.4 – Barreira de protecção à esquerda do LVDT superior

Para criar esta “barreira de protecção” optou-se por implementar um sistema constituído por um conjunto de dois detectores ópticos de reflexão, um dos quais com fibra óptica. De modo a tornar uma montagem mais compacta na zona do LVDT superior, foi aí usado o detector de fibra óptica. Este tipo de detectores contém um emissor e um receptor incorporados. Nos detectores de fibra óptica esta funciona como meio de condução de luz. A presença de um objecto a uma certa distância origina uma alteração do sinal de saída do detector. Estes detectores são caracterizados por amplas gamas de detecção, sendo este um factor importante

nesta aplicação. De facto, a distância de detecção situa-se entre 20 a 30 mm. Outro factor que influenciou a escolha foi a possibilidade de permitir a detecção de blocos padrão de diferentes materiais: aço, cerâmica e tungsténio.

3.3. Implementação e teste

O detector de fibra óptica, D_1 , foi instalado de acordo com a estratégia descrita no ponto 3.2. A localização do detector permitirá, pois, criar uma “barreira de protecção”. A Figura 3.5 documenta a localização dos detectores: o detector D_1 do lado esquerdo e o detector óptico, D_2 , por cima do LVDT superior.

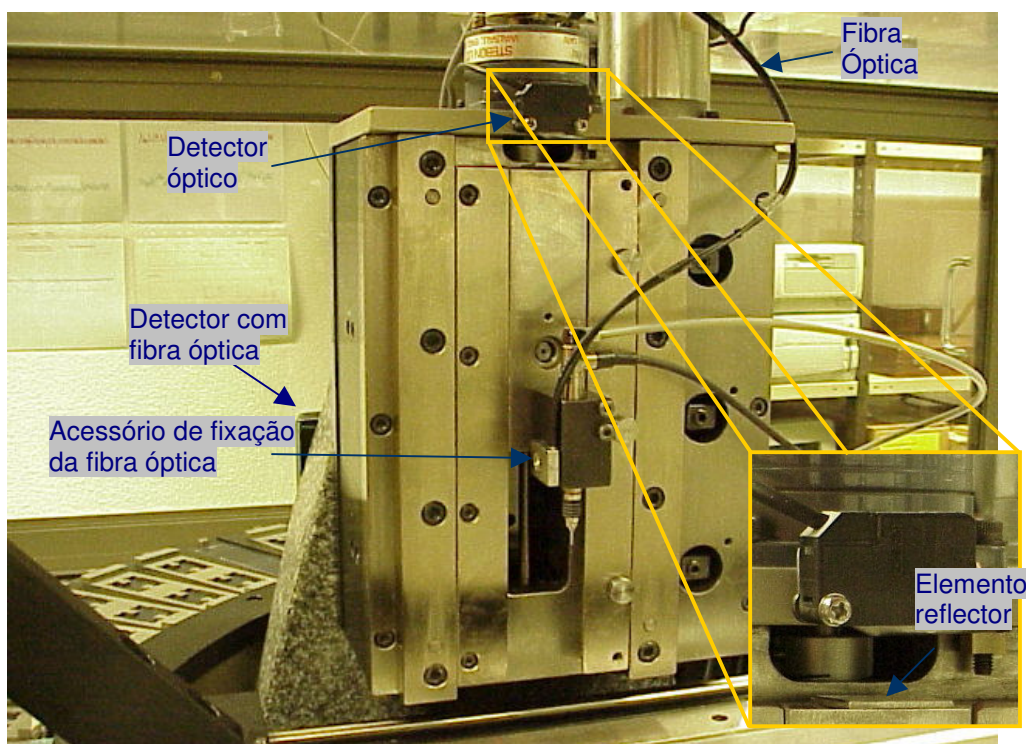


Figura 3.5 – Localização dos detectores de proximidade

A função do detector D_1 é, então, parar o sistema quando algum bloco padrão (por excesso de dimensão) interceptar a “barreira de protecção”. Optou-se por interligar o detector em série com o circuito de segurança. A alteração do seu sinal de saída funcionaria como um “botão de emergência”.

O programa de controlo do sistema SACBP leva o LVDT superior à posição inicial sempre que é accionado qualquer botão de emergência. Assim, para rearmar o sistema de segurança foi integrado o detector D_2 . Em caso de avaria deste, o sinalizador luminoso, L, ficará

permanentemente activo. Nesta situação o sistema de segurança poderá ser manualmente rearmado através da botoneira, B.

Para melhor compreensão do modo de funcionamento do sistema de segurança apresenta-se o fluxograma da Figura 3.6. Quando o sistema SACBP se encontra em funcionamento normal, o sistema de segurança está activo (estado inicial). Se a “barreira de protecção” for ultrapassada, o detector D_1 é accionado. Consequentemente, o sistema SACBP pára, a lâmpada L liga e o detector D_1 fica desactivado. Por acção da botoneira B ou por accionamento do detector D_2 , o sistema SACBP volta ao estado inicial.

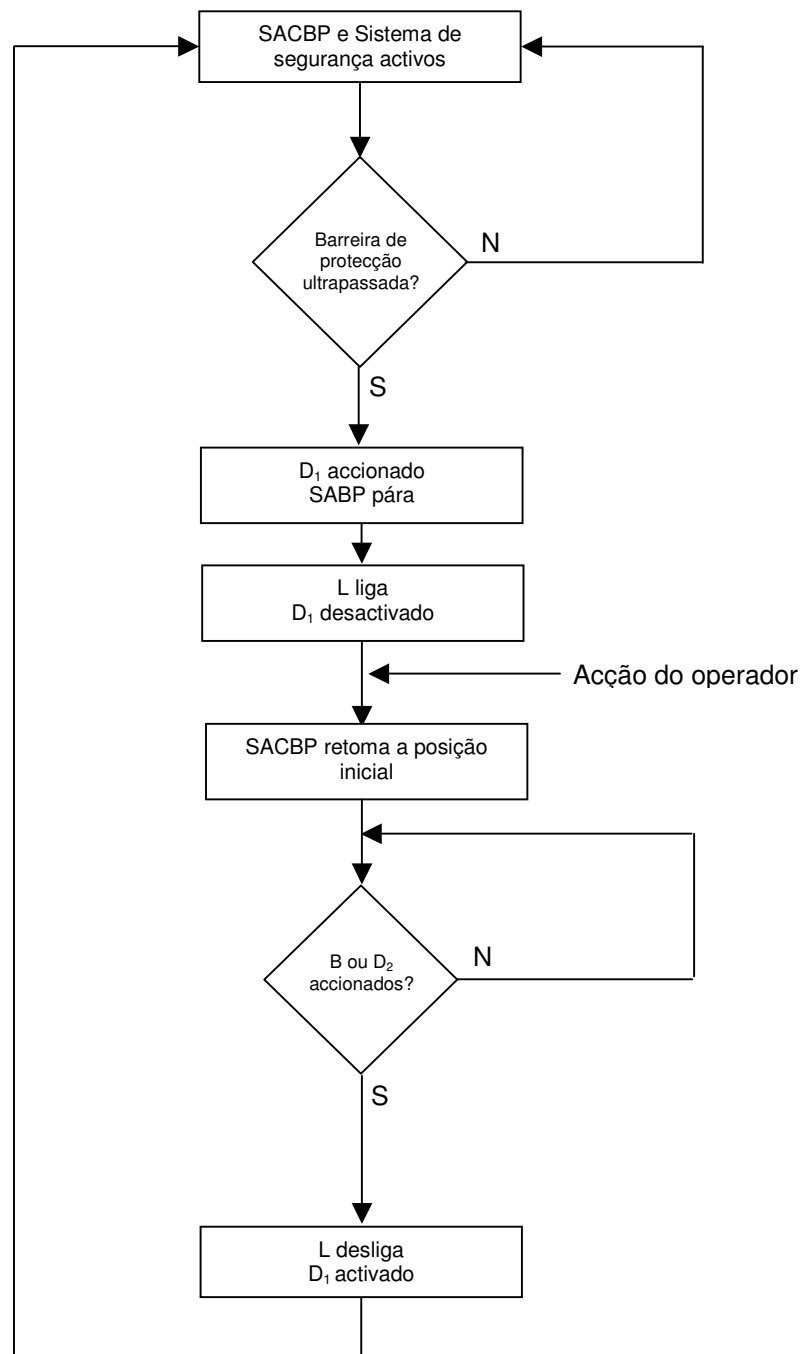


Figura 3.6 – Fluxograma do modo de funcionamento do sistema de segurança

Na Figura 3.7 pode ver-se o esquema eléctrico do sistema de segurança.

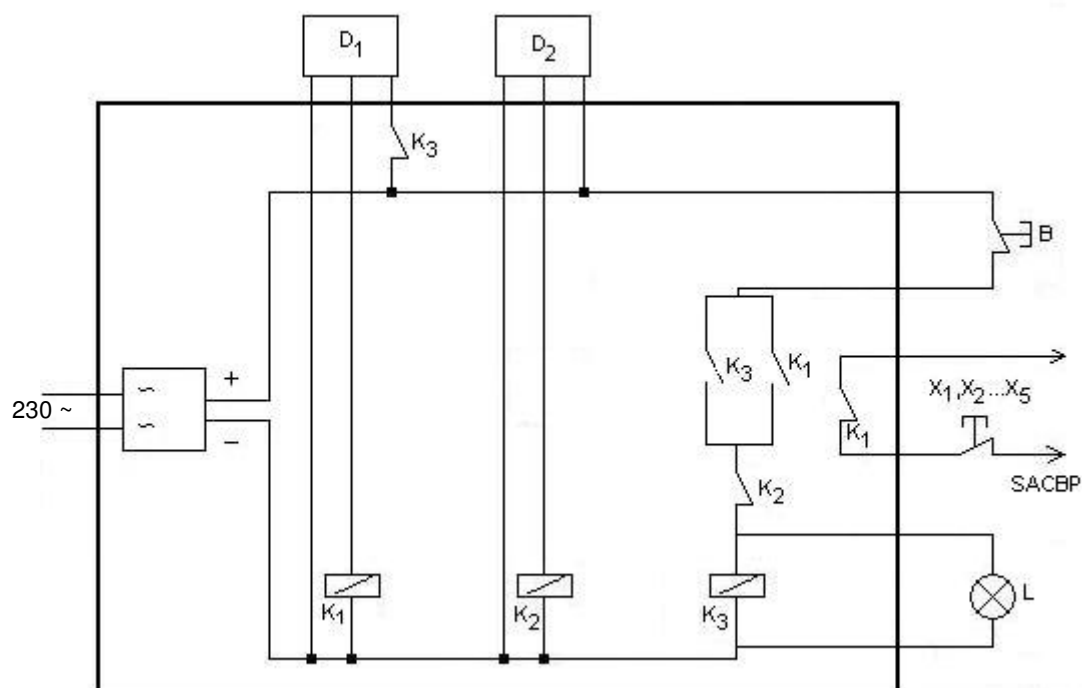


Figura 3.7 – Esquema do circuito do sistema de segurança

Na Tabela 3.1 é apresentada a descrição dos símbolos usados para representar os vários elementos aplicados na criação do sistema de segurança.

Tabela 3.1 – Descrição dos símbolos da Figura 3.7

Símbolo	Descrição
D ₁	Detector óptico de fibra
D ₂	Detector óptico
L	Lâmpada de sinalização de desactivação do sistema de segurança
B	Botoneira de activação do sistema de segurança
X ₁ , X ₂ ... X ₅	Botões de emergência
K ₁	Relé associado ao detector D ₁
K ₂	Relé associado ao detector óptica D ₂
K ₃	Relé associado à botoneira B

4. Condições ambientais

A realização da *calibração* de blocos padrão pressupõe a criação de condições ambientais adequadas. Estas visam criar uma envolvente ambiental estável e uniforme no espaço em que as *medições* são realizadas. Nem sempre é possível criar as melhores condições, por razões técnico-económicas em toda a área de laboratório, sendo então necessário criá-las no espaço confinado ao trabalho de *calibração*. Nesse sentido, devem ser ponderadas as opções ambientais possíveis de forma criteriosa. Esse estudo deverá ter em conta o nível de *incerteza de medição* que se pretende garantir, correspondendo esse, em regra, a diferentes exigências ambientais.

Tendo em conta o domínio de *calibração*, a *gama* e a *incerteza* associados à *medição*, terá que ser determinada a influência de cada parâmetro ambiental sobre a *mensuranda*. O rigor respeitante ao seu conhecimento tem que ser assegurado e também disponibilizado para efeitos de evidenciação do cumprimento dos requisitos estabelecidos nos manuais da qualidade de qualquer laboratório acreditado.

No processo de acreditação de uma *calibração* o que está em causa não é o ambiente geral do laboratório, que facilita e cria melhores condições de estabilidade e uniformidade nas condições da área onde as *medições* são realizadas, mas, em cada caso, a observância dos valores das grandezas de influência e o cômputo das respectivas contribuições para os valores e *incerteza*, na *medição*, na área restrita dedicada à *calibração*. Por vezes, há interesse em preservar, na envolvente do laboratório, outros parâmetros que não tenham directamente influência nos resultados dos trabalhos realizados, de que é exemplo a grandeza humidade.

4.1. Estudo das condições ambientais

O estudo das condições ambientais deve passar pela identificação das grandezas de influência relevantes, pela determinação das variações máximas admissíveis e pelas escolhas dos métodos adequados à preservação das condições [11].

A identificação das grandezas de influência relevantes passa pela caracterização da *cadeia de medição* envolvida na *calibração* e pelo estudo das especificações dos diversos elementos dessa cadeia [11].

A determinação das variações máximas para cada uma das grandezas de influência depende, acima de tudo, dos níveis de *incerteza* que os laboratórios pretendem garantir. A influência de cada grandeza identificada como relevante deve ser estudada nas diversas contribuições para o

valor da *mensuranda* e para a respectiva *incerteza de medição*, por forma a constatar os limites de variação admissíveis. Estes limites vão orientar a escolha dos sistemas de ar condicionado e, por outro lado, vão funcionar fundamentalmente como indicadores para a definição das características dos *instrumentos de medição* das grandezas de influência a preservar no ambiente de trabalho (zona de medição). Assim, este estudo detalhado dos limites de variação admissíveis para as grandezas de influência tem que ter em conta as características e especificações dos *padrões*, dos outros equipamentos utilizados, dos *métodos de medição* empregues e o tipo de *instrumentos* ou *padrões* a calibrar [11].

Naturalmente que, em paralelo com as decisões técnicas tomadas, devem ser ponderadas questões económicas. A capacidade para medir e manter dentro dos limites definidos os valores das grandezas de influência consideradas relevantes traduz-se necessariamente numa melhor capacidade de *medição* do laboratório. Porém, a referida capacidade exige soluções técnicas tanto mais onerosas quanto menor for o contributo dessas grandezas de influência para a *incerteza da medição*, sendo essas soluções função do domínio e do nível hierárquico em que o laboratório pretende desenvolver as suas actividades.

Para evidenciar as condições ambientais existentes, um laboratório de *calibração* deve possuir os registos necessários das condições ambientais por ele definidas para os trabalhos desenvolvidos [11].

Deverão ser tidas em conta as considerações que se encontram documentadas em normas, regulamentos, recomendações ou outros documentos aplicáveis às condições ambientais de referência. Embora cada laboratório tenha de registar as condições ambientais e garantir que estas não invalidam os *resultados das medições* efectuadas, deverá também determinar a influência das condições ambientais no *resultado das medições* da *mensuranda* em causa, ou seja, calcular o seu contributo para a incerteza global do *resultado de medição*.

A temperatura, principalmente, mas também a humidade são as grandezas a ter em conta na *calibração* de blocos padrão.

A seguir vão ser descritos o modo como se procura preservar as condições ambientais e a sua influência no processo de *calibração*.

4.1.1. Preservação das condições ambientais no sistema SACBP

O sistema SACBP está montado numa das salas do Laboratório de Metrologia Dimensional do CATIM. A climatização desta cumpre as exigências estabelecidas para os laboratórios de metrologia dimensional. Por questões logísticas e pela necessidade de manter as condições exigidas para a *calibração* de blocos padrão, o laboratório tem um volume reduzido comparativamente aos outros laboratório metrológicos do CATIM.

As perturbações que podem interferir nas condições ambientais foram objecto, também, de especial cuidado. O acesso à sala é feito, unicamente, por porta que dá acesso a uma outra sala

climatizada nas mesmas *condições de referência*. Por sua vez, a entrada nesta é feita através de uma antecâmara que minimiza as perturbações causadas pelo exterior. O próprio sistema SACBP possui uma blindagem de protecção que tem como principal função criar uma envolvente ambiental estável e uniforme no espaço em que as *medições* são realizadas.

O acesso à sala é restrito e limitado o número de pessoas (normalmente duas). Há o cuidado de colocar todas as fontes de calor (computadores, iluminação...) em funcionamento antes do começo dos trabalhos de *calibração*, durante tempo suficiente que permita a estabilização das condições ambientais exigidas.

As acções comportamentais e implementações técnicas têm como base a experiência que o CATIM possui na vivência das *calibrações* e em normas, documentos e recomendações existentes nesta área.

No entanto, a capacidade para medir e conhecer, com a *exactidão* actual, os valores das grandezas de influência consideradas relevantes (temperatura e humidade) no processo de *calibração* de blocos padrão foi uma das mais-valias do trabalho desenvolvido e que está na base desta dissertação. Para isso foi implementado um *sistema de medição* das condições ambientais, que permitiu uma melhoria da capacidade de *medição* do laboratório e monitorização e evidência das condições ambientais.

4.1.2. Influência da temperatura

Das condições ambientais, de uma forma geral, a temperatura é um dos factores mais relevantes, sendo também importante pela relação que tem com a humidade. A influência da temperatura pode ser mais ou menos determinante, consoante o domínio metrológico em causa e o grau de *incerteza*.

Qualquer corpo muda de dimensões com a alteração da sua temperatura. Por esta razão, na metrologia dimensional a temperatura é, na maior parte das vezes, a grandeza com maior influência nos *resultados de medição*. A grandeza temperatura não pode ser ignorada na *medição* de comprimentos, fundamentalmente quando se efectua *medições* com elevada *exactidão*. Sendo a *calibração* de blocos padrão uma das mais exigentes ao nível de *exactidão*, o conhecimento da temperatura é fulcral para a determinação do *resultado de medição*.

Para garantir um bom funcionamento do sistema SACBP, a especificação do fabricante exige uma temperatura ambiental de $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$. Dentro da câmara de *calibração* da máquina a amplitude de variação máxima deve ser, em períodos de 30 minutos, de $\pm 0,2 ^\circ\text{C}$.

As dimensões dos blocos padrão estão directamente relacionadas com a temperatura, através do seu coeficiente de expansão térmico. Por esta razão, na *calibração* de todos os blocos padrão os resultados são apresentados para a temperatura de referência: $20 ^\circ\text{C}$. Torna-se então fundamental no caso da temperatura, seja a do ar, seja a dos dispositivos envolvidos na

calibração, conhecer, para além do desvio em relação ao valor de referência - 20 °C - a sua estabilidade temporal e espacial.

A nível normativo e no que respeita a recomendações, existem diversos documentos que abordam o tema das condições ambientais e, mais especificamente, o da temperatura. A norma ISO 1 [12], para as especificações e verificações dimensionais e geométricas de produtos, estabelece para temperatura normal de referência o valor de 20 °C. A recomendação CNQ 5/2001 [11], para laboratórios de *calibração*, aponta o valor médio de 20 °C com variações máximas de ± 1 °C. A norma ISA RP52.1 (Instrument Society of America) indica, para laboratórios secundários de metrologia, a observância da temperatura ambiental de $(20 \pm 0,3)$ °C e $(20 \pm 0,1)$ °C, na zona de trabalho [2].

A evidenciação da especificação das temperaturas do laboratório e do ambiente de trabalho passou pela análise de todos factores acima descritos. Mas passou, também, pelo propósito de obter uma melhor capacidade de *medição* (melhor *incerteza de medição*) do Laboratório de Metrologia Dimensional na *calibração* de blocos padrão.

Na Tabela 4.1 estão indicadas quais as condições de temperatura seleccionadas por intermédio das células assinaladas.

Tabela 4.1 – Requisitos da temperatura

	ISO 3650 [4]	CNQ 5/2001 [11]	ISA RP52.1	Fabricante
Requisitos para temperatura da sala	20 °C	(20 ± 1) °C	$(20 \pm 0,3)$ °C	$(20 \pm 0,5)$ °C
Requisitos para temperatura do ambiente de trabalho	---	---	$(20 \pm 0,1)$ °C	$(20 \pm 0,2)$ °C

No que reporta às condições de temperatura foram escolhidas as apontadas pelo fabricante do sistema SACBP. Desta forma, garante-se o melhor funcionamento do sistema. É, no entanto, importante sublinhar que as condições de temperatura do ambiente de trabalho influenciam os *resultados de medição*. Nesta perspectiva é necessário ter um *sistema de medição* de temperatura que permita, por um lado, poder efectuar correcções dos valores medidos (critério exposto no parágrafo 4.2) e, por outro lado, contribuir para uma melhor capacidade de *medição* (questão tratada no capítulo 6).

4.1.3. Requisitos da grandeza humidade

A humidade, não tendo directamente qualquer influência nos resultados, tem uma acção directa na oxidação dos materiais. De acordo com a recomendação CNQ 5/2001, o valor apontado para

a humidade relativa do ar é de 45 %, com variações máximas de ± 10 %, não devendo nunca exceder o valor de 60 %. [11].

4.2. Selecção de transdutores

A preservação das condições ambientais, no local do sistema SACBP, é assegurada para que as especificações sejam cumpridas. Sabe-se, através de estudos efectuados no passado, que os gradientes de temperatura e humidade na sala não são significativos. Sabe-se, também, que as condições na zona de *medição* são muito estáveis e uniformes. Assim, é suficiente ter um *transdutor* de temperatura/humidade no centro da sala (T_S) e um *transdutor* de temperatura/humidade no ambiente de trabalho (T_{AT}) para ter o melhor conhecimento possível sobre as condições ambientais que influenciam a *calibração* de blocos padrão.

Estes *transdutores* devem preencher os requisitos para a *medição* da temperatura e da humidade de acordo com as especificações acima indicadas. Terão que ter, pelo menos, uma *gama de medição* de temperatura de 19 °C a 21 °C, e de humidade de 35 % a 60 %.

A *resolução* para a medição da humidade, tendo em conta as variações máximas de ± 10 %, é de pelo menos de 1 %. Os dois *transdutores*, integrados no sistema de aquisição das condições ambientais, cumprem este requisito. O *transdutor* T_S tem *resolução* de 1 % e o *transdutor* T_{AT} tem *resolução* de 0,1 %.

Relativamente à *resolução* da *medição* da temperatura no laboratório, tendo em vista cumprir o objectivo atrás definido, de $(20 \pm 0,5)$ °C, foi seleccionado o *transdutor* T_S VAISALA HMD40Y que, integrado no sistema de aquisição, garante uma *resolução* de 0,1 °C.

Em relação à *resolução* da *medição* da temperatura no ambiente de trabalho, tendo em vista cumprir o objectivo atrás definido de $(20 \pm 0,1)$ °C, foi seleccionado o *transdutor* T_{AT} VAISALA HMP231 que, igualmente integrado no sistema de aquisição, garante uma *resolução* de 0,01 °C. Este nível de *resolução* cumpre também o objectivo de permitir introduzir correcções relativamente aos *resultados da medição* durante a *calibração* sempre que a temperatura não seja a de referência - 20 °C -, como se verá seguidamente:

De acordo com a definição do *método de medição* diferencial, o comprimento do bloco padrão (L_x) é obtido somando a diferença (ΔL) ao *valor convencionalmente verdadeiro* do bloco padrão de referência (L_R), sendo determinado pela equação (4.1).

$$L_x = L_R + \Delta L \quad (4.1)$$

Se a temperatura de medição não for de 20 °C, terá que ser feita a correcção de acordo com a equação (4.2), sendo que, nesta, $L_{x20^\circ\text{C}}$ representa o valor do bloco padrão a calibrar a 20 °C e $L_{R20^\circ\text{C}}$ o valor do bloco padrão de referência dado pelo certificado de *calibração* interferométrica, igualmente a 20 °C.

$$L_{x20^{\circ}C} = L_{R20^{\circ}C} + \Delta L_{20^{\circ}C} \quad (4.2)$$

O valor corrigido para 20 °C do valor ΔL_T , $\Delta L_{20^{\circ}C}$, é dado por:

$$\Delta L_{20^{\circ}C} = \Delta L_T + L(\alpha_x - \alpha_R)(20 - T) \quad (4.3)$$

Aqui, L é o *valor nominal* dos blocos padrão, ΔL_T é a diferença medida à temperatura, T , e α_x e α_R os coeficientes de expansão térmica do bloco padrão a calibrar e do de referência, respectivamente.

A equação (4.3) permite avaliar, de acordo com a característica do sistema SACBP, o valor mínimo da diferença entre a temperatura de referência e a temperatura de medição ($\Delta T = 20 - T$) para o qual $\Delta L_{20^{\circ}C} \neq \Delta L_T$, tomando como limite metade da *resolução* do próprio sistema (0,005 μ m).

$$L(\alpha_x - \alpha_R)(20 - T) = 0,005\mu m \quad (4.4)$$

Considere-se, ainda, o caso mais desfavorável: comprimento nominal (L) máximo do bloco padrão - 100 mm; máxima diferença de coeficiente de expansão térmica ($\alpha_x - \alpha_R$) - 7,27E-06 °C⁻¹ (diferença entre o coeficiente de expansão de um bloco padrão de tungsténio - 4,23E-06 °C⁻¹ - e o coeficiente de expansão de um bloco em aço - 11,5E-06 °C⁻¹). O valor de ΔT será:

$$\Delta T = 0,01^{\circ}C \quad (4.5)$$

Analisando as características das várias alternativas possíveis - *gama de medição*, sinal de saída (*sinal de medição*); *exactidão* e custo - optou-se por dois *transdutores* da marca VAISALA (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Transdutores Vaisala

Observando as características principais destes *transdutores*, listadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, é fácil concluir que o factor da *exactidão* pesou na escolha do *transdutor* para o ambiente de trabalho.

Tabela 4.2 – Características do *transdutor* HMD40Y

Transdutor HMD40Y		
Características	Humidade	Temperatura
<i>Gama de medição</i>	10...90 %RH	-10...+60 °C
<i>Exactidão</i>	Melhor que ± 3 %RH	$\pm 0,3$ °C
<i>Sensor</i>	INTERCAP Sensor, part no. 155778HM	Pt 100 IEC 751 classB
<i>Sinal de saída ou de medição</i>	4...20mA	4...20mA

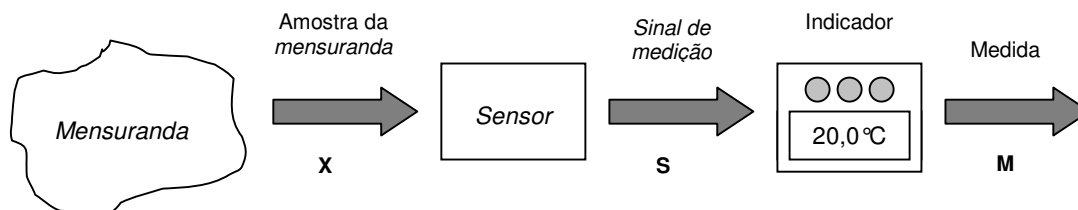
Tabela 4.3 – Características do *transdutor* HMP231

Transdutor HMP231		
Características	Humidade	Temperatura
<i>Gama de medição</i>	0...100 %RH	-20...+60 °C
<i>Exactidão</i>	± 1 %RH	$\pm 0,1$ °C
<i>Sensor</i>	HUMICAP	Pt 100 IEC 751 1/3 class B
<i>Sinal de saída ou de medição</i>	4...20mA	4...20mA

4.3. Aplicação e desenvolvimento

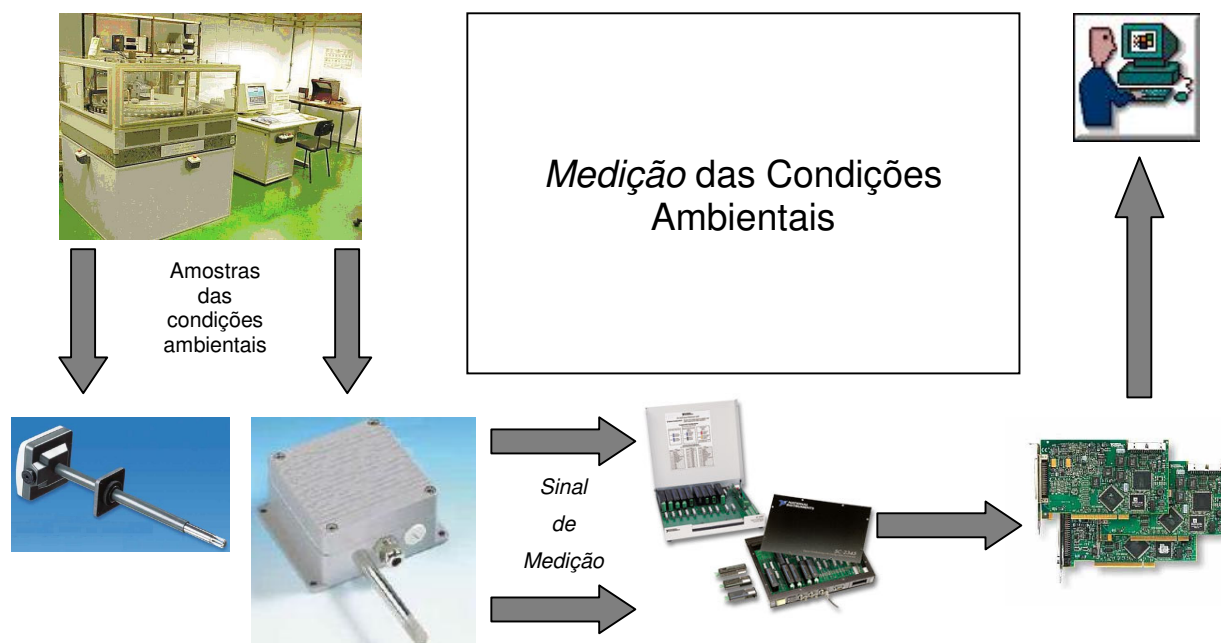
Tomando a definição de *medição* como o conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor de uma grandeza [1], podemos, de uma forma genérica, representar esse modelo conforme Figura 4.2 [13].

As amostras (X) da grandeza particular submetida à *medição* (*mensuranda*) influenciam directamente o elemento do *instrumento de medição* afectado pela *mensuranda* (*sensor*), o qual dá origem a uma grandeza (S) que a representa e que lhe está funcionalmente ligada (*sinal de medição*), que finalmente é disponibilizada por intermédio de um dispositivo para leitura (M).

Figura 4.2 – Modelo genérico de uma *medição*

Baseado no modelo de *medição* descrito e tendo em mente a definição de *instrumento de medição* - dispositivo destinado à execução da *medição*, isolado ou em conjunto com equipamentos suplementares - criou-se um sistema capaz de traduzir as necessidades impostas de *medição* das condições ambientais.

Pode fazer-se a analogia do modelo genérico de uma *medição* com o sistema implementado, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3 – Sistema de *medição* das condições ambientais implementado

Assim, o *sistema de medição* é composto por dois *transdutores* temperatura/humidade (HMD40Y e HMP231), por uma placa de aquisição PCI 6023E, pelo respectivo condicionador de sinal SCC-2345 da National Instruments e por um computador. A opção por esta solução deveu-se fundamentalmente ao facto de se tratar de um sistema completamente aberto.

A localização dos *transdutores* teve em conta a suas características. Assim, tal como as Figuras 4.4 e 4.5 mostram, o de maior *exactidão* foi montado na zona de *medição*, enquanto que o de menor *exactidão* ficou colocado no centro da sala.

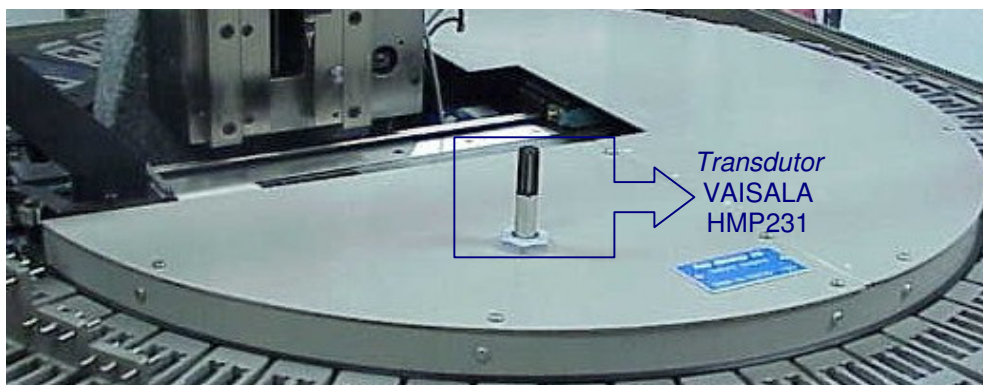


Figura 4.4 – *Transdutor* VAISALA HMP231 montado na zona de *medição*

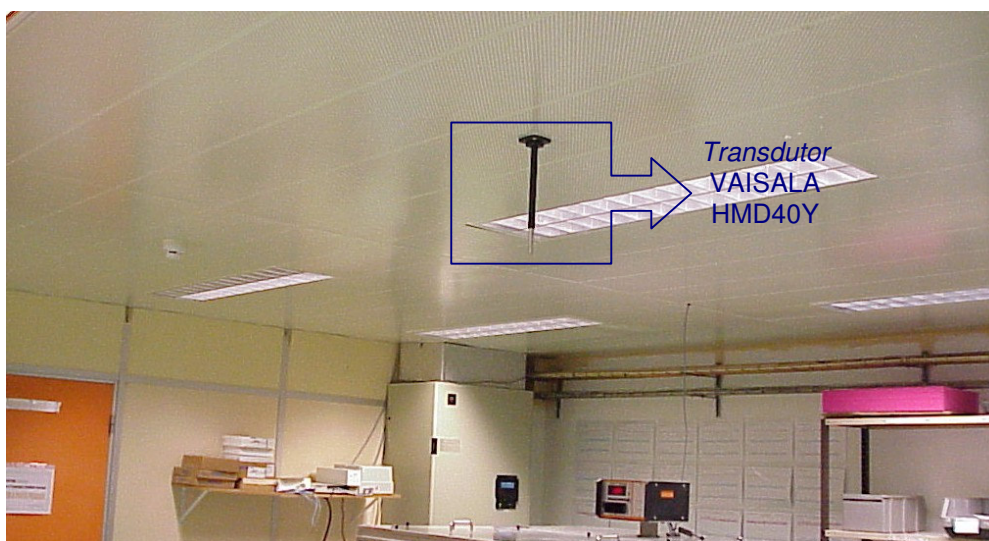


Figura 4.5 – *Transdutor* VAISALA HMD40Y no centro da sala

Após a selecção e implementação dos *transdutores*, desenvolveu-se uma aplicação amigável com o utilizador para monitorização e registo das condições ambientais. A aplicação foi desenvolvida com base na utilização conjunta de Excel com Visual Basic. A comunicação com os *transdutores* é assegurada pelo software “Measure vers. 2.0” através do “Data Acquisition Add-In”. Toda a informação necessária para ambos os *transdutores* - temperatura/humidade actual, máxima, mínima, variações de temperatura/humidade - pode ser visualizada numa janela com o aspecto da Figura 4.6.

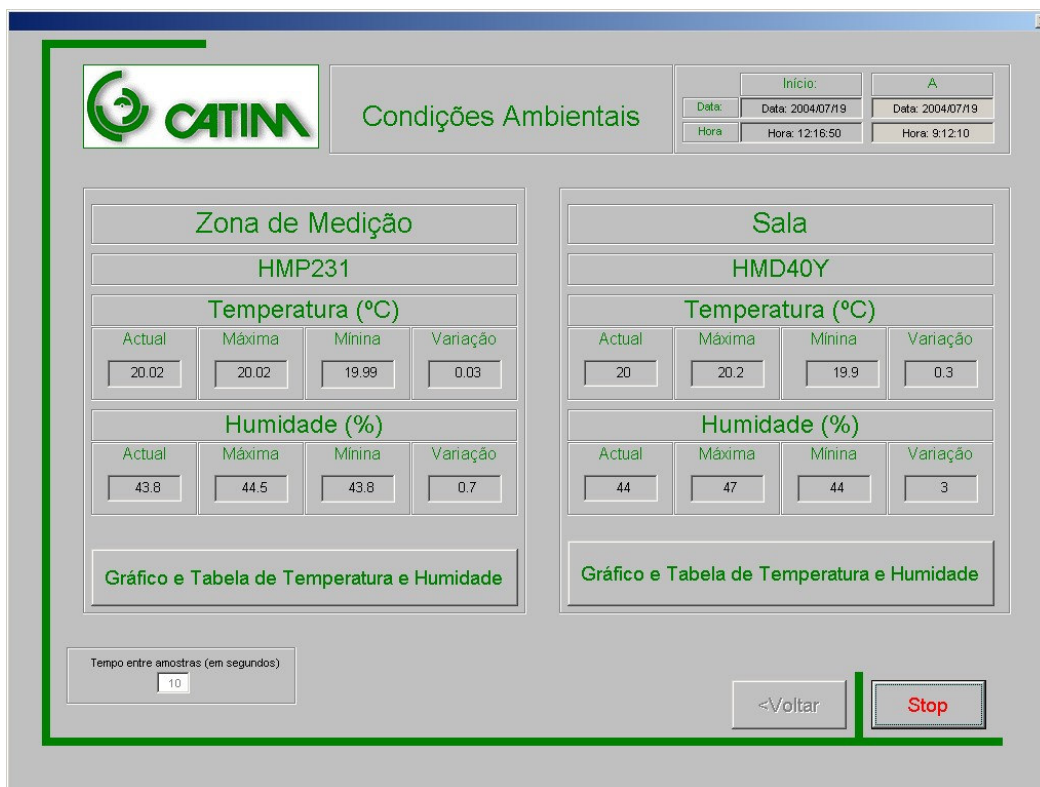


Figura 4.6 – Menu de apresentação de toda a informação das condições ambientais

Há a possibilidade de aceder, para cada *transdutor*, a outros menus (Figura 4.7). Estes, apresentam em forma de tabela e gráfico a informação referente às condições ambientais.

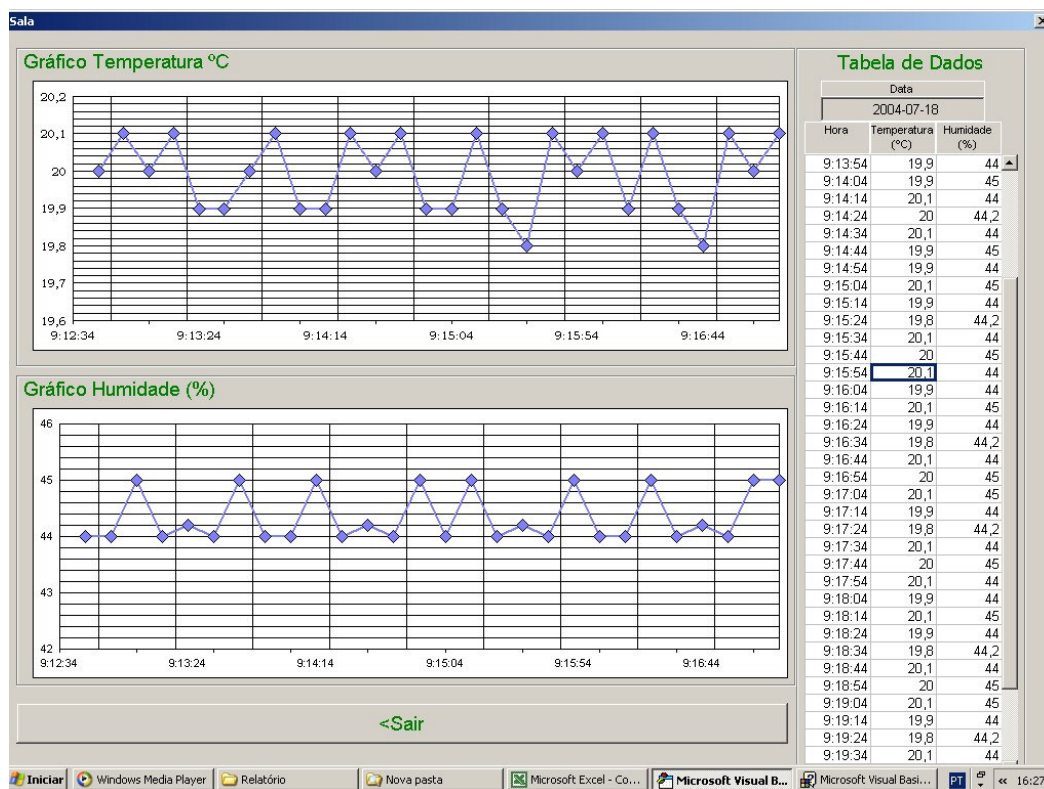


Figura 4.7 – Menu de apresentação, do *transdutor* da sala, da informação em gráfico e tabela

4.4. Validação e vantagens da solução

A validação do sistema de monitorização das condições ambientais foi feita pela própria *calibração* do sistema. Os erros deste, obtidos na *calibração*, são corrigidos por intermédio de software e a *incerteza de calibração* utilizada nos cálculos dos resultados obtidos. Foi usado para esta análise o certificado LMD20045000270/10 (Anexo B).

A criação deste *sistema de medição* das condições ambientais trouxe melhorias substanciais ao processo de *calibração* dos blocos padrão: conhecimento, fiabilidade e registo das condições ambientais. Ao mesmo tempo, permitiu ter acesso à informação, em tempo real, sobre as condições de temperatura durante a *calibração*. No passado, parte dessa informação era baseada em estudos: estabilidade e uniformidade das condições ambientais das áreas envolvidas.

5. Interface para monitorização e processamento dos dados de medição

A criação de uma nova interface para monitorização das condições ambientais e pós-processamento de dados foi a tarefa que contribuiu para o aumento da produtividade e para a redução da probabilidade de introdução de erros na elaboração dos certificados para *calibração* de blocos padrão com o sistema SACBP.

De facto, a melhoria da produtividade está relacionada directamente com a redução do tempo de elaboração do certificado. Em termos médios, a transferência e o processamento de dados e a elaboração do certificado apresentam um ganho de 90% relativamente ao procedimento anterior, com vantagens acrescidas na leitura das condições ambientais com maior acuidade.

5.1. Requisitos para a apresentação dos resultados

Os resultados das *calibrações* realizadas pelos laboratórios devem ser apresentados de forma exacta, clara, inequívoca e objectiva, e de acordo com as instruções específicas dos métodos de *calibração* [19]. São geralmente apresentados ao cliente num certificado de *calibração* que deve incluir todas as informações solicitadas por aquele e necessárias para a interpretação dos resultados da *calibração*, bem como todas as informações exigidas pelo método utilizado. A informação normalmente requerida, segundo a norma NP EN ISO/IEC 17025 [19], é a seguinte:

- a) um título (por exemplo “Certificado de *Calibração*”);
- b) o nome e a morada do laboratório;
- c) a identificação inequívoca do certificado de *calibração* (nº de série, referência interna, modelo, etc.), a identificação das páginas que garanta o reconhecimento de qualquer uma como fazendo parte desse certificado de *calibração*, bem como a identificação clara do fim do certificado;
- d) o nome e a morada do cliente;
- e) a identificação do método utilizado;
- f) a descrição, estado e identificação inequívoca dos itens calibrados;
- g) a data da realização da *calibração*;
- h) nome(s), função(ões) e assinatura(s) ou identificação(ões) equivalente(s), da(s) pessoa(s) que valida(m) o certificado de *calibração*;
- i) as condições (por exemplo, ambientais) em que as *calibrações* foram realizadas que possam afectar os *resultados da medição*;

- j) a *incerteza da medição* e/ou declaração de conformidade com uma especificação metrológica identificada, ou com cláusulas dessa especificação;
- k) evidência da *rastreabilidade* das *medições*.

Segundo o manual da qualidade do CATIM, os registos devem ser efectuados em impressos próprios e codificados. Estes impressos são definidos de modo a possibilitar a repetição da *calibração* em condições idênticas às originais. Para tal, esses impressos devem permitir identificar os itens a calibrar, os factores que afectam a *incerteza das medições* e o certificado a que deram origem. Todas as informações, dados e cálculos relativos às *calibrações* devem ser registados nos respectivos impressos. Estes registos são arquivados para esclarecimento de qualquer questão que surja após a *calibração*, durante um período de tempo estipulado de 5 anos e em local que garanta a sua confidencialidade.

5.2. Alterações do sistema original

No computador dedicado ao sistema SACBP, existe uma aplicação de origem em ficheiro MS-DOS que permite ler e armazenar em disco os sinais dos *sensores* durante a *calibração*. Originalmente, o procedimento para elaboração do certificado exigia a introdução manual de toda a informação necessária para processamento de dados e elaboração do certificado de acordo com o ponto 5.1. Existiam certificados tipo, em Microsoft Word®, com campos para preenchimento manual. Estes campos eram constituídos pela informação que varia de *calibração* para *calibração* (por exemplo: o número de identificação do certificado, o nome e morada do cliente, a data de *calibração*, os resultados de *calibração*,...). Para se ter uma ideia da quantidade de informação necessária, observe-se o exemplo do certificado de uma caixa de 87 blocos padrão identificado como LMD20045003619/30, apresentado no Anexo B (Figura B. Note-se, ainda, que a maioria dos dados são referentes aos *resultados de medição* (desvio do ponto central, máximo desvio do *valor nominal* e variação dos pontos medidos).

Para melhorar a rapidez e diminuir as falhas provenientes do procedimento original para elaboração de certificados, foram introduzidas alterações a nível do hardware (actualização do computador de suporte e respectivo sistema operativo, placa de rede e sistema de aquisição de dados das condições ambientais) e foi desenvolvida uma aplicação. Deste modo, o computador em rede tem acesso aos ficheiros de dados, podendo, assim, proceder à sua transferência automática para inclusão na aplicação desenvolvida e processamento automático do certificado de *calibração*. A aplicação possibilita, também, através de uma interface bastante amigável, preencher os campos de informação (dados do cliente e dos blocos padrão).

5.3. Descrição da aplicação de interface desenvolvida

A aplicação foi desenvolvida em Excel com integração de Microsoft Visual Basic 6.0. A opção por esta ferramenta deve-se à capacidade de cálculo do Excel e à facilidade, juntamente com o Visual Basic, na produção de relatórios (incluindo o certificado de *calibração*) e menus de interface com o utilizador. Permite, também, interagir com a aplicação desenvolvida para a aquisição das condições ambientais e, deste modo, contabilizar a influência da temperatura nos valores de *calibração*.

Nas próximas páginas vão ser apresentados os principais menus da aplicação. No Menu inicial é possível seleccionar o sistema de *calibração* utilizado (SACBP ou o sistema manual), conforme Figura 5.1. Ao desenvolver esta aplicação optou-se por incluir a possibilidade da sua utilização com o sistema manual existente no Laboratório.



Figura 5.1 – Menu inicial

No Menu de entrada (Figura 5.2) começa por se seleccionar o número de blocos padrão a calibrar, através dos botões com caixas pré-definidas, ou do botão “Caixa Não Standard” para outras situações. No caso de ser necessário o retorno a um certificado previamente criado para qualquer rectificação ou emissão de uma 2ª via, usa-se o botão “Escolher Certificado”



Figura 5.2 – Menu de entrada - Escolha do número de blocos padrão ou de certificado já elaborado

No Menu de dados do cliente e de *calibração* (Figura 5.3) existem vários campos que têm de ser obrigatoriamente preenchidos (o número de identificação do certificado, que está identificado como “Processo”, nome e morada do cliente, data de *calibração*, data do certificado, técnico e responsável). Neste menu foram criadas possibilidades para acesso às condições ambientais e para carregar o ficheiro de dados das *medições* (Figura 5.4) e ainda para introdução do resultado da planeza e dos números de série dos blocos padrão (Figura 5.5).

The screenshot shows the CATIM software interface. The title bar is 'Calibração de Blocos Padrão - TESA'. The main window has a green background. On the left, there is a sidebar with buttons: 'Activar Condições Ambiente', 'Carregar Ficheiro', 'Introduzir Valores de Calibração Manualmente', 'Resultado da Planeza', and 'Correcção Valores de Calibração'. The main area is divided into two sections: 'Dados do Cliente' and 'Dados de Calibração'. In 'Dados do Cliente', there are fields for 'Processo' (LMD - ExemploDissertação), 'Nome Cliente' (CATIM - Metrologia Dimensional), 'Morada Cliente' (RUA DOS PLÁTANOS, 197), and 'Código Postal' (4100-414 PORTO). In 'Dados de Calibração', there is a date format 'aaaa-mm-dd' and fields for 'Data de Calibração' (2004-07-23), 'Técnico' (Isabel Perfeito), 'Data do Certificado' (2004-07-23), and 'Responsável' (Pedro Frutuoso). At the bottom right, there are buttons '< Voltar' and 'Avançar >'. There is also a 'Ficheiro' field and a 'Carregar Ficheiro' button.

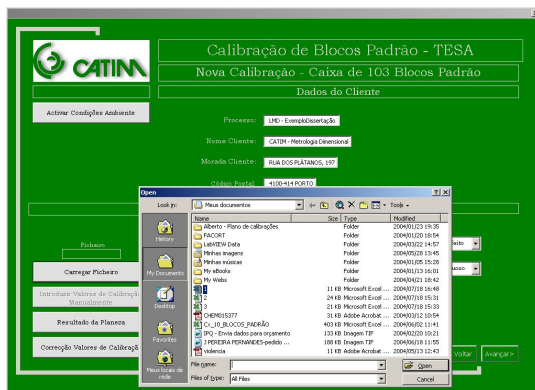
Figura 5.3 – Menu dados do cliente e dados de *calibração*

Figura 5.4 – Menu de carregar o ficheiro de dados

Figura 5.5 – Menu para introdução de *planeza* e números de série

No caso da *calibração* ser efectuada com o sistema manual, o botão “Introduzir Valores de *Calibração* Manualmente” (Figura 5.3) permite introduzir os valores de medição manualmente através do menu da Figura 5.6. O menu da Figura 5.7 permite visualizar os resultados de *calibração* (desvio do ponto central, máximo desvio medido, variação dos pontos medidos e planeza), os dados introduzidos referentes aos valores nominais e os números de série. Este menu é de grande utilidade, pois permite corrigir, após a sua análise, alguma gralha que tenha sido cometida na introdução dos dados.

Figura 5.6 – Menu de introdução manual dos resultados de *calibração*

Figura 5.7 – Menu de análise de resultados de *calibração*

A Figura 5.8 apresenta o Menu de dados dos blocos padrão e os equipamentos utilizados na *calibração*. Através dele devem ser introduzidas as informações sobre os blocos padrão a calibrar (descrição, marca, *grau*, material, coeficiente de expansão térmica...) e devem ser seleccionados os equipamentos usados na *calibração*.

Figura 5.8 – Menu de dados dos blocos padrão e equipamentos utilizados

O Menu final (Figura 5.9) permite visualizar e imprimir o certificado de *calibração* e os relatórios detalhados dos dados da *calibração*, das condições ambientais registadas automaticamente e da *incerteza expandida*.

Tanto o certificado como os registos cumprem os requisitos a que são obrigados pela norma NP EN ISO/IEC 17025 [19] e o manual da qualidade do CATIM (ponto 5.1).



Figura 5.9 – Menu final

O certificado pode ser visualizado e impresso, para validação, através da selecção do respectivo botão "Ver/Imprimir Certificado" (Figura 5.9). Os relatórios de registo dos dados de *calibração* e dos resultados de *calibração* podem ser visualizados e impressos através dos menus das Figuras 5.10 e 5.11, por intermédio da selecção dos respectivos botões. O Menu final permite, também, visualizar qual a *incerteza expandida de medição* obtida para a *calibração* em causa. Mas, para que todos estes botões (o de "Incerteza expandida" e os de visualização) deste menu fiquem disponíveis é necessário accionar o botão "Condições Ambientais", o que permite, também, visualizar e imprimir todos os dados de temperatura e humidade referentes ao período de *calibração*. Desta forma, ficam registadas todas as informações e disponíveis para monitorização.

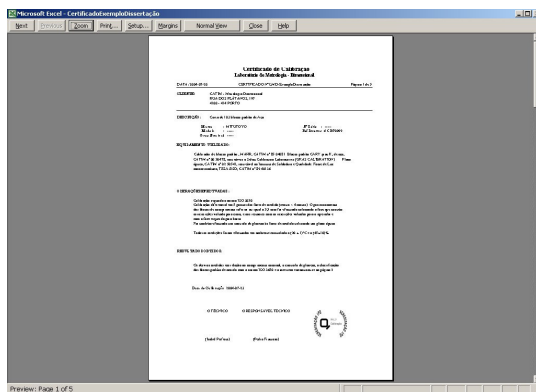


Figura 5.10 – Menu de visualização e impressão do certificado de *calibração*

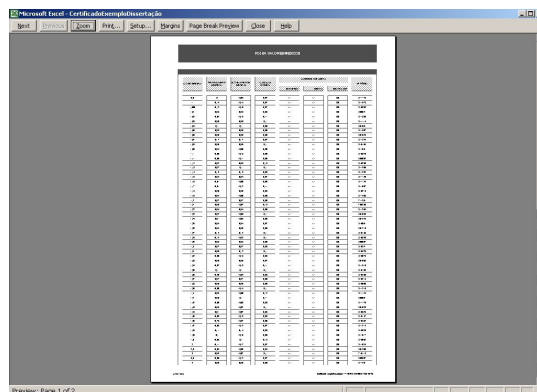


Figura 5.11 – Menu de visualização dos resultados de *calibração*

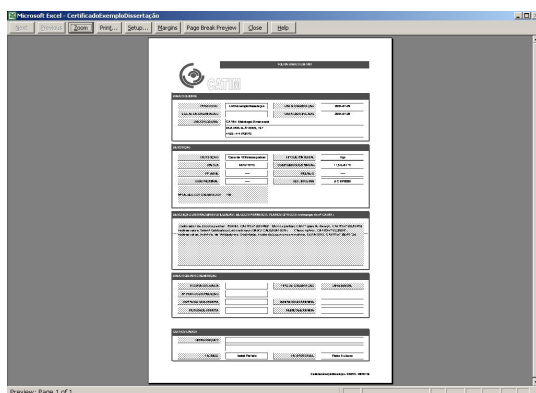


Figura 5.12 – Menu de visualização e impressão dos dados de *calibração*

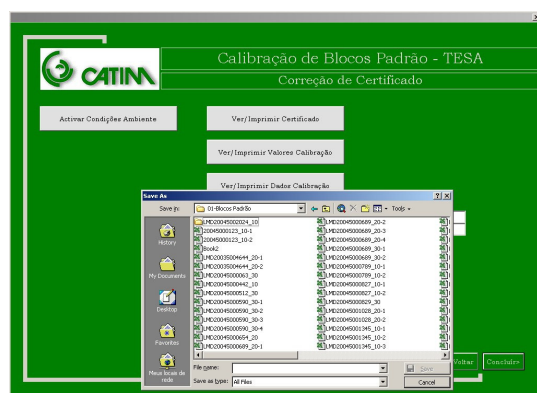


Figura 5.13 – Menu para gravar o ficheiro final

Para terminar o processamento e a monitorização da informação da *calibração* é necessário selecciona-se o botão “Concluir”. Esta operação permite gravar o ficheiro num directório seleccionado através do menu da Figura 5.13.

5.4. Objectivos e ganhos

Os principais objectivos que nortearam o trabalho perspectivavam o aumento de produtividade e a diminuição da probabilidade de erros inerentes à tarefa de manipulação de dados por um operador.

Para além do ganho médio estimado de 90% para a transferência e processamento de dados e para a elaboração do certificado, pode-se ainda estimar um ganho médio de 20% em todo o processo de *calibração* pelo sistema SACBP. Este ganho médio traduz-se em cerca de 10% do tempo de operador em horário normal.

A transferência automática dos valores de *calibração* confere uma completa confiança nos resultados obtidos e apresentados nos certificados, onde apenas os erros grosseiros eram anteriormente detectados.

Contudo, a par destes, crescem naturalmente outros ganhos. Assim, a aplicação desenvolvida permite também uma melhor organização e facilidade de acesso à informação por parte do utilizador. Por outro lado, o controlo da actualização de dados inerentes à *rastreabilidade* dos blocos padrão de referência e a formatação do próprio certificado estão apenas disponíveis ao responsável. Como se verá no Capítulo 6, observa-se ainda um ganho na *incerteza* associada à *calibração*. Deve referir-se, ainda, que todo este processo será objecto de uma auditoria.

6. Incerteza de medição na calibração

Numa *medição* o valor medido esperado é o *valor verdadeiro* da *mensuranda*. No entanto, os *valores verdadeiros* são por natureza indetermináveis e só seriam possíveis de obter através de *medições* perfeitas. *Medições* perfeitas são impossíveis de realizar. Todos os processos de *medição* se deparam com dúvidas permanentes. As dúvidas estão relacionadas com os *padrões de referência* (conservação das suas características), os *procedimentos de medição* (se utilizados correctamente), as *condições de referência* (de que modo afectam o resultado e se mantiveram), etc. e reflectem as lacunas do conhecimento completo do valor da *mensuranda*. Das dúvidas e da certeza de que cometemos erros quando se efectua qualquer *medição*, surge o conceito de *incerteza de medição*.

A *incerteza de medição* é o parâmetro associado ao *resultado da medição*, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à *mensuranda* [1].

6.1. Erros na medição

Não há nada mais certo do que errar quando se faz uma *medição*. Todo o *resultado de uma medição* está afectado de um erro. Esse erro, cujo *valor verdadeiro* nunca será completamente conhecido, com origem no processo de medição é o resultado das contribuições de um grande número de fontes de incerteza que não sendo o objecto da *medição*, influenciam a determinação do *valor verdadeiro* da *mensuranda*.

A contribuição de cada uma das fontes de erro pode assumir um carácter sistemático e/ou aleatório dando, por essa razão, origem a componentes do *erro de medição* que se podem classificar de *erro sistemático* ou *erro aleatório*. Os *erros sistemáticos* caracterizam-se por terem sempre o mesmo valor médio e sinal para as mesmas condições no processo de *medição*. Por sua vez, os *erros aleatórios* caracterizam-se por não terem o mesmo valor e sinal para condições idênticas do processo de medição.

Independentemente da componente do erro ser de carácter sistemático e/ou aleatório, ambas têm origem no processo de *medição*. O processo de *medição* entendido como a execução de um *procedimento de medição* inclui como fontes de incerteza relevantes para a *medição*: os *instrumentos de medição* e *padrões*, os operadores, o *princípio* e o *método de medição* e as condições ambientais. Contudo, tendo os *erros sistemáticos* e aleatórios origem nestas fontes de incerteza, a contribuição de cada uma das fontes de incerteza varia consideravelmente consoante o tipo de *calibrações*.

6.2. Conceito e importância da incerteza no resultado da medição

Não sendo possível determinar os *valores verdadeiros* das várias componentes do erro no *resultado de uma medição*, as incertezas associadas aos efeitos aleatórios e/ou sistemáticos que contribuem para o erro podem ser avaliadas. Assim, o *resultado de uma medição* deve ser expresso por um *valor convencionalmente verdadeiro* com uma incerteza associada. Porém, mesmo que as incertezas avaliadas sejam pequenas isso não garante que o erro do *resultado da medição* seja pequeno, uma vez que um efeito sistemático pode ter passado despercebido, por não ser reconhecido. Assim, a incerteza de um *resultado de uma medição* não é necessariamente, uma indicação de quanto o *resultado da medição* está próximo do resultado da *mensuranda*. Ela é simplesmente uma estimativa de quanto o *resultado da medição* está próximo do melhor valor que é consistente com o conhecimento disponível.

A *incerteza de medição* é assim uma expressão que traduz, para uma dada *mensuranda*, um infinito número de valores dispersos em torno do *resultado da medição* que são consistentes com todas as observações, dados e conhecimentos existentes.

Por definição, a *incerteza* é o parâmetro associado ao *resultado da medição*, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à *mensuranda*. De um ponto de vista filosófico, a expressão da *incerteza* denuncia a incapacidade de se ter um conhecimento “absoluto” sobre o *valor verdadeiro* da grandeza que se mede. Por outro lado, de um ponto de vista prático, o *resultado de uma medição*, entendido como a melhor estimativa do valor da *mensuranda*, sem ser acompanhado da respectiva *incerteza* não deve, por isso, ser publicado ou comunicado, uma vez que ainda não é um resultado, ou seja, não está completo. É importante realçar que a *incerteza de medição* deve ser realista. Isto quer dizer que minorar a *incerteza* associando, sem fundamento, demasiada confiança aos valores expressos, pode gerar consequências indesejáveis. Por outro lado, majorar o valor da *incerteza* associada a um equipamento pode obrigar a uma nova aquisição na realidade desnecessária.

6.3. Requisitos de medição

A *medição* para ter a sua fiabilidade avaliada, deve ter os seus atributos qualificados e/ou quantificados. Assim, quando se usa a expressão “boa exactidão”, está-se a classificar qualitativamente a *medição* em causa. Quando se apresenta a sua *incerteza*, tendo sido assegurada a *rastreabilidade* da *medição*, está-se a classificá-la quantitativamente.

A expressão da *incerteza* associada ao *resultado da medição* permite compará-lo com outro obtido por outra(s) pessoa(s), ou laboratório(s), em iguais condições. Esta razão não é a única

nem talvez a mais importante. Os novos paradigmas da sociedade moderna como a globalização, a competitividade, a qualidade e os avanços tecnológicos, entre outros, têm demonstrado a necessidade e mesmo a exigência do uso de *incertezas nas medições* realizadas.

6.4. Incerteza no resultado da medição

A *medição*, definida como um conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor particular de uma grandeza, denominada *mensuranda*, tem subjacente conhecimentos de base fundamentais (Figura 6.1):

- a estrutura científica da *medição*, suportada nas leis e/ou princípios da física, da química, da mecânica, etc. (*princípio de medição*);
- o conjunto de actividades a efectuar, utilizando *instrumentos de medição* e *padrões* adequados, segundo uma determinada sequência lógica de operações, descritas genericamente, utilizadas na execução de *medições* (*método de medição*);
- o conjunto de operações descritas pormenorizadamente, envolvidas na execução de uma *medição* em particular, segundo um dado método (*procedimento de medição*);
- em determinadas condições de medição (por exemplo, ambientais).

Após determinação da *mensuranda* e para completar o *resultado da medição* é necessário recorrer à determinação da *incerteza de medição* que, regra geral, e em laboratórios de *calibração*, é representada pela *incerteza expandida de medição*. Para a determinar a melhor estimativa da *incerteza expandida de medição* são precisas várias etapas (Figura 6.1).

Uma estimativa razoável deve basear-se no conhecimento do desempenho do *método* e do âmbito da *medição* e recorrer, por exemplo, à experiência adquirida e aos dados que se possuam. O grau de rigor necessário para uma estimativa da *incerteza de medição* depende, neste caso, dos requisitos do método de ensaio, dos requisitos do cliente e da existência de limites nos quais se baseiam as decisões de conformidade com uma especificação.

A avaliação da *incerteza* não é um trabalho rotineiro nem puramente matemático; depende de um conhecimento detalhado da natureza da *mensuranda* e do processo de *medição*. A qualidade e utilidade da *incerteza* determinada para o *resultado de uma medição* depende, em última instância, da capacidade de análise crítica e da integridade das pessoas que contribuem para a sua determinação.

A modelização da *incerteza* é uma das etapas mais importantes e deve reflectir a operação de *medição* e possuir um nível de informação que represente as condições de *medição*.

Não menos importante é a contabilização de todas as fontes de incerteza identificadas e significativas para o processo de *medição* bem como estimar a respectiva contribuição para a incerteza global.

No seio de algumas entidades, principalmente as que estão envolvidas com Laboratórios de *Calibração* Acreditados, deve-se expressar a *incerteza de medição* como *incerteza expandida de medição* U , obtida mediante a multiplicação da *incerteza-padrão*, u , resultante da estimativa da *grandeza de saída* por um *factor de expansão*, k .

Após completadas as várias etapas chegamos ao valor da *incerteza expandida de medição* que define o intervalo do *resultado de medição* em que se espera estar incluída uma fracção da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à *mensuranda*.

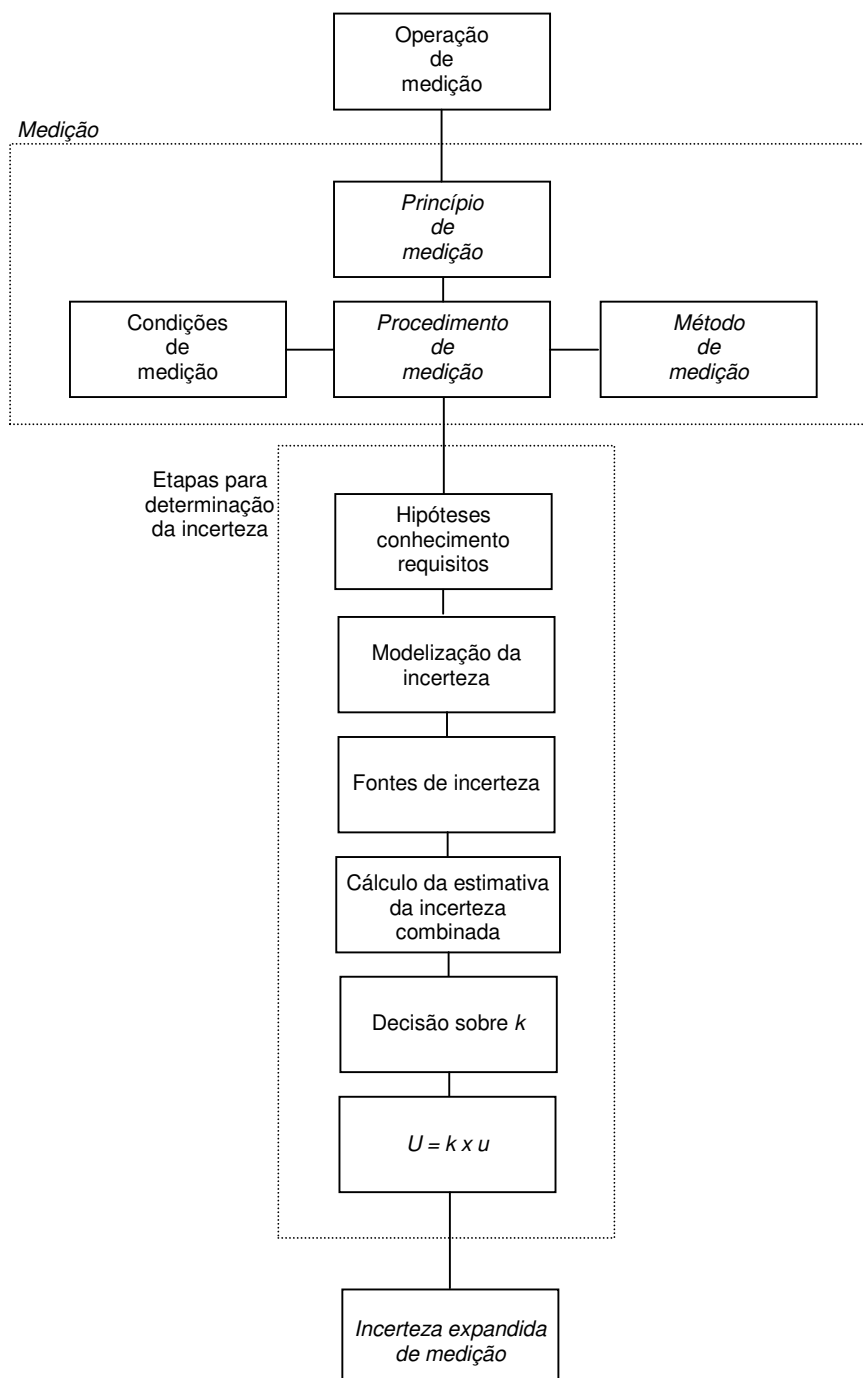


Figura 6.1 – Etapas para determinação da *incerteza de medição* após operação de medição

6.5. Guia para a expressão da incerteza de medição

O conceito de incerteza generalizou-se para que assim se pudesse caracterizar uma estimativa possível do erro associado a qualquer *medição*.

Dentro do contexto da generalização da incerteza houve necessidade de estabelecer um guia internacional. A principal motivação foi a busca de um consenso sobre a avaliação e expressão da *incerteza de medição* de modo a permitir que o significado de um vasto espectro de *resultados de medições* na investigação e desenvolvimento, no comércio e na indústria, pudesse ser prontamente compreendido e adequadamente interpretado.

O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição editado pela ISO – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) é o documento mais completo e consistente no que respeita à definição de critérios e regras gerais para a avaliação e para a expressão da *incerteza de medição* em vários níveis de exactidão. Este é um guia abrangente que pode contemplar as *medições* industriais ou comparações internacionais ao nível de laboratórios nacionais de metrologia, proporcionando a uniformidade necessária nas avaliações dos organismos acreditados e/ou de reconhecimento mútuo. É claro que cada um dos casos, o grau de complexidade e aprofundamento sobre o conhecimento da natureza da *mensuranda* são distintos. Como o GUM fornece regras gerais para avaliar e exprimir a *incerteza de medição* e não instruções detalhadas sobre o cálculo da mesma, surge a necessidade de estabelecer normas ou documentos de referência, com base nos princípios por ele estabelecidos. No caso da *calibração de instrumentos de medição*, existem publicações específicas, por exemplo, do NPL, do NIST e da EA.

De acordo com a Norma NP EN ISO/IEC 17025: 2000 [19], qualquer laboratório de *calibração*, que execute as suas próprias *calibrações*, deve possuir e aplicar procedimentos escritos para estimar a *incerteza da medição* e de todos os tipos de *calibração* que realize. Para cumprimento deste requisito normativo apresenta-se o modelo matemático de cálculo da *incerteza expandida de medição* no ponto 6.6 e sua determinação para os blocos padrão de 0,5 a 100 mm no ponto 6.7.

6.6. Modelo matemático para a expressão da incerteza expandida

Ao ser uma questão metrológica, a expressão da *incerteza das medições*, subjacente à definição de *rastreabilidade*, é um requisito fundamental para a credibilidade de quem apresenta os *resultados das medições* e para a confiança de quem os utiliza, pelo que exige a elaboração de um modelo matemático para a sua estimativa. O modelo apresentado é baseado no documento EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” (documento específico aplicável para a estimativa da incerteza nas *calibrações*).

No modelo que a seguir se apresenta, válido para qualquer domínio de medição, todas as grandezas físicas que não sejam exactamente conhecidas são tratadas como aleatórias, incluindo as grandezas de influência relevantes. A grandeza a medir “ Y ”, função de um conjunto de grandezas de entrada “ X_i ” ($i=1, 2, 3, \dots, n$) pode exprimir-se matematicamente pela expressão:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (6.1)$$

Uma vez que os *valores verdadeiros* de X_i são desconhecidos na avaliação da incerteza global do *resultado da medição* têm de ser usados valores estimados “ x_i ”, sendo o resultado “ y ” uma estimativa do *valor verdadeiro* da grandeza Y dado por:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (6.2)$$

O modelo consiste no seguinte:

- Exprimir em termos matemáticos a dependência da *grandeza de saída* Y em relação às grandezas de entrada X_i , de acordo com a equação (6.1).
- Listar todas as grandezas de influência e o modo de cálculo da respectiva incerteza. A *incerteza de medição do resultado de uma medição* reflecte as lacunas do conhecimento completo do valor da *mensuranda*. O conhecimento completo exige uma infinita quantidade de informação. Os fenómenos que contribuem para a incerteza e, portanto, para o facto de o *resultado da medição* não poder ser caracterizado por um único valor, são chamados fontes de incerteza. Na prática, há muitas fontes de *incerteza de medição* possíveis:
 - definição incompleta da *mensuranda*;
 - realização imperfeita da definição da *mensuranda*;
 - amostragem não representativa;
 - influência das condições ambientais mal conhecida ou deficientemente medida;
 - erros de leitura dos instrumentos analógicos;

- *resolução* finita dos instrumentos ou limites de mobilidade;
- valores inexactos dos *padrões* e dos materiais de referência;
- valores inexactos das constantes e outros parâmetros obtidos na bibliografia e utilizados no algoritmo matemático;
- aproximação e hipóteses contidas no *método e procedimento de medição*;
- variação nas observações repetidas da *mensuranda*, aparentemente, nas mesmas condições;

c) Calcular a *variância* experimental $s_{x_i}^2$, como uma estimativa da incerteza dos valores X_i , para grandezas medidas repetidamente. Para n *medições* independentes o valor estimado x_i do *valor convencionalmente verdadeiro* da grandeza X_i , é dado pela média aritmética ($\bar{q}$) dos valores individualmente medidos $q_{i,j}$ ($j=1, \dots, n$):

$$x_i = \bar{q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{i,j} \quad (6.3)$$

Dado que a estimativa x_i é muito sensível a valores extremos, nenhum dos valores envolvidos no seu cálculo deve ser muito discrepante relativamente aos restantes. Uma estimativa da *variância* experimental é obtida por:

$$s_{q_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_i)^2 \quad (6.4)$$

A melhor estimativa da *variância* da média $\bar{q}_i$ é a *variância* experimental da média dada por:

$$s_{x_i}^2 = s_{q_i}^2 = \frac{1}{n} s_{q_i}^2 \quad (6.5)$$

Quando uma *grandeza de entrada*, X_i , é estimada a partir de uma série de observações repetidas, em que se conhece ou é possível conhecer a sua distribuição estatística de probabilidade e, como consequência, calcular o respectivo *desvio padrão experimental*, a componente da incerteza assim estimada é classificada de incerteza do tipo A.

- d) Adoptar os valores das *variâncias* conhecidas ou que possam ser calculadas, por exemplo, de valores *resultantes de medições* anteriores, valores de literatura, etc. No caso de existirem apenas valores isolados é possível estimar as *variâncias* com base na experiência.
- e) Para fontes de incerteza cuja distribuição da população é conhecida ou possa ser assumida, calcular a apropriada *variância* para essa distribuição.

Numa situação ideal, existindo uma série de observações de todas as grandezas das quais o *resultado de medição* depende, a sua incerteza poderá ser calculada por meios estatísticos, ou seja, como sendo uma incerteza do tipo A. Na prática, isto nem sempre é possível e poderia, por exemplo, tornar uma *calibração* ou ensaio, economicamente inviável. Torna-se necessário avaliar as componentes da incerteza de outras formas, tomando por base outros critérios de julgamento científico e todas as informações disponíveis sobre a variabilidade das estimativas de entrada. Estas são chamadas incertezas do tipo B. Informações prévias, experiências sobre o comportamento de *padrões* e *instrumentos*, especificações dos fabricantes, dados de certificados de *calibração*, entre outras, podem ser usadas para a sua avaliação.

Para avaliar a incerteza tipo B é necessário que uma distribuição de probabilidades da quantidade X_i , seja assumida com base na teoria ou experiência, para permitir determinar o respectivo desvio padrão. Assim:

- se apenas forem conhecidos, ou estimados, os limites superior a^+ e inferior a^- , então a distribuição que se assume será a distribuição rectangular. Neste caso a média é dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(a^+ - a^-) \quad (6.6)$$

E a *variância* por

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{12}(a^+ - a^-)^2 \quad (6.7)$$

- A diferença entre os valores limites for $2a$, então:

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{3}a^2 \quad (6.8)$$

- For assumido que os valores da quantidade X_i estão mais próximos do centro do intervalo do que dos limites (a^+ e a^-), então a distribuição triangular é mais adequada, sendo a sua *variância* dada por:

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{6}a^2 \quad (6.9)$$

- For assumido que os valores de X_i estão mais provavelmente nos extremos do intervalo, a distribuição de probabilidade do tipo “U” (bimodal) é a mais adequada. Neste caso, a *variância* é dada por:

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{2} a^2 \quad (6.10)$$

f) Relacionar as *variâncias* $s_{x_i}^2$ de todas as grandezas de entrada não correlacionadas com a *grandeza de saída* e somá-las, para obter a *variância* combinada, de acordo com a equação:

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^N c_i^2 s_{x_i}^2 \quad (6.11)$$

Em que c_i é o *coeficiente de sensibilidade* associado à *estimativa da grandeza de entrada* x_i , i.e., a derivada parcial da função parcial modelo f em relação a X_i , avaliada nas estimativas x_i da *grandeza de entrada*,

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{x_1=x_1, \dots, x_n=x_n} \quad (6.12)$$

O *coeficiente de sensibilidade* c_i descreve como a grandeza estimada de saída y é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada x_i .

Considerando a definição de *variância* pode-se apresentar a equação (6.11), como sendo o quadrado da *incerteza padrão* da estimativa da *grandeza de saída* y , da seguinte forma:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \quad (6.13)$$

Tomando a grandeza $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) como a contribuição para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída* y , resultando da *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de entrada* x_i ,

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (6.14)$$

podemos rescrever a equação (6.13) da seguinte forma:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (6.15)$$

g) Calcular a incerteza global (expandida) “ U ”, multiplicando o desvio padrão, obtido na equação (6.15), pelo *factor de expansão* k :

$$U = k \times u(y) \quad (6.16)$$

h) Nos casos em que a distribuição normal (Gaussiana) pode ser atribuída à *mensuranda* e a incerteza associada à estimativa da *grandeza de saída* tenha suficiente fiabilidade, deve ser usado o *factor de expansão* $k = 2$. A *incerteza expandida* expressa corresponde a uma probabilidade expandida de aproximadamente de 95 %. Estas condições são preenchidas, na maioria dos casos encontrados, nos trabalhos de *calibração*.

A hipótese de uma distribuição normal nem sempre pode ser facilmente confirmada experimentalmente. A fiabilidade da *incerteza padrão* atribuída à estimativa da *grandeza de saída* é determinada pelos *graus de liberdade efectivos*. Contudo, os critérios de fiabilidade são sempre atingidos nos casos em que nenhuma das contribuições para a incerteza é obtido por avaliação do Tipo A baseada em pelo menos de dez observações repetidas.

Se uma destas condições (normalidade ou fiabilidade suficiente) não for preenchida, o *factor de expansão* $k = 2$ pode levar a uma *incerteza expandida* que corresponde a uma probabilidade expandida inferior a 95%. Nestes casos, e de forma a assegurar que o valor da *incerteza expandida* apresentado corresponde a uma probabilidade expandida que é a mesma que no caso normal, têm de ser seguidos procedimentos. O uso da mesma probabilidade expandida é essencial sempre que dois *resultados de medição* de uma dada grandeza têm de ser comparados, quando se avaliam os resultados de uma comparação interlaboratorial ou se avalia a conformidade com uma especificação.

Mesmo quando se assume uma distribuição normal, pode ocorrer que a *incerteza padrão* da estimativa da *grandeza de saída* não seja suficientemente fiável. Se, neste caso, não for prático aumentar o número de *medições* repetidas n ou utilizar uma avaliação de Tipo B em vez do Tipo A de fraca fiabilidade, deve ser usado o método de cálculo dos *graus de liberdade efectiva*, v_{ef} , para determinar o *factor de expansão* k .

A estimativa do *factor de expansão* k , correspondendo a uma determinada probabilidade expandida requer que seja tida em conta a fiabilidade da *incerteza padrão* $u(y)$ da estimativa da *grandeza de saída* y . Isto significa tomar em devida conta a forma como $u(y)$ estima o desvio padrão associado ao *resultado de medição*. Na estimativa do desvio padrão de uma distribuição normal, o número de *graus de liberdade efectivos* dessa estimativa, que depende da dimensão da amostra utilizada, é uma medida da fiabilidade. Do mesmo modo, uma medida adequada de fiabilidade da *incerteza padrão* da *estimativa de saída* é o número de

graus de liberdade efectivos, ν_{ef} , que é aproximadamente representado pela apropriada combinação dos números de *graus de liberdade efectivos* das suas diferentes contribuições para a incerteza $u_i(y)$.

O procedimento para o cálculo do *factor de expansão* k adequado, quando as condições do Teorema do Limite Central são reunidas, compreende os seguintes passos:

- 1) Obter a *incerteza padrão*, $u(y)$, da estimativa da *grandeza de saída* y .
- 2) Estimar o número de *graus de liberdade efectivos*, ν_{ef} , da *incerteza padrão*, $u(y)$, da estimativa da *grandeza de saída*, y , pela fórmula de Welch-Satterthwaite

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (6.17)$$

Em que $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$), definidos pela equação (6.14), são as contribuições para a *incerteza padrão* da *estimativa de saída* y , resultantes das incertezas padrão das estimativas de entrada x_i , assumidas como estatística e mutuamente independentes e, ν_i , é o número de *graus de liberdade efectivos* da componente da *incerteza padrão* $u_i(y)$. Para uma dada *incerteza padrão* obtida por uma avaliação de Tipo A como referida no ponto b), o número de *graus de liberdade efectivos* é dado por $\nu_i = n-1$. É mais problemático associar *graus de liberdade* com uma *incerteza padrão* $u(x_i)$ obtida por uma avaliação de Tipo B. Contudo, é prática corrente efectuar tais avaliações de forma a garantir que não foi cometida qualquer subestimação. Se, por exemplo, são definidos limites inferior e superior, a^- e a^+ , eles são habitualmente escolhidos por forma a que a probabilidade da grandeza em questão estar fora destes limites seja de facto extremamente pequena. Nesta hipótese, o número de *graus de liberdade* da *incerteza padrão* $u(x_i)$ obtida por uma avaliação de Tipo B pode ser tomada $\nu_i \rightarrow \infty$. Ao considerar-se a componente de incerteza associado à utilização de *padrões* ou de *instrumentos de medição* calibrados por uma entidade externa ao laboratório, e sempre que o respectivo certificado de *calibração* não indique o número de *graus de liberdade efectivos* da *calibração*, mas somente o *factor de expansão* $k = 2$, deverá assumir-se um número de *graus de liberdade efectivos* igual a 50.

O *factor de expansão* k pode ser obtido através da tabela de valores (Tabela 6.1). Esta tabela está baseada numa distribuição “t de student” avaliada para uma probabilidade expandida de 95,45 %. Se ν_{ef} não é inteiro, o que é normalmente o caso, truncar ν_{ef} para o inteiro mais baixo.

Tabela 6.1 – *Factores de expansão* k para diferentes números de *graus de liberdade efectivos* ν_{ef}

ν_{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

6.7. Determinação da incerteza expandida de calibração de blocos padrão

Pretende-se determinar a *incerteza expandida de calibração* associada à *calibração* de blocos padrão na gama 0,5 a 100 mm, mediante medição diferencial, utilizando como *padrões de referência* blocos padrão calibrados por interferometria.

As considerações feitas sobre os requisitos, o conhecimento, a modelização e as fontes de incerteza da operação de medição, são feitas tendo em conta o *princípio de medição*, o *método de medição*, o *procedimento de medição* e as condições em que o sistema SACBP realiza a *calibração* dos blocos padrão.

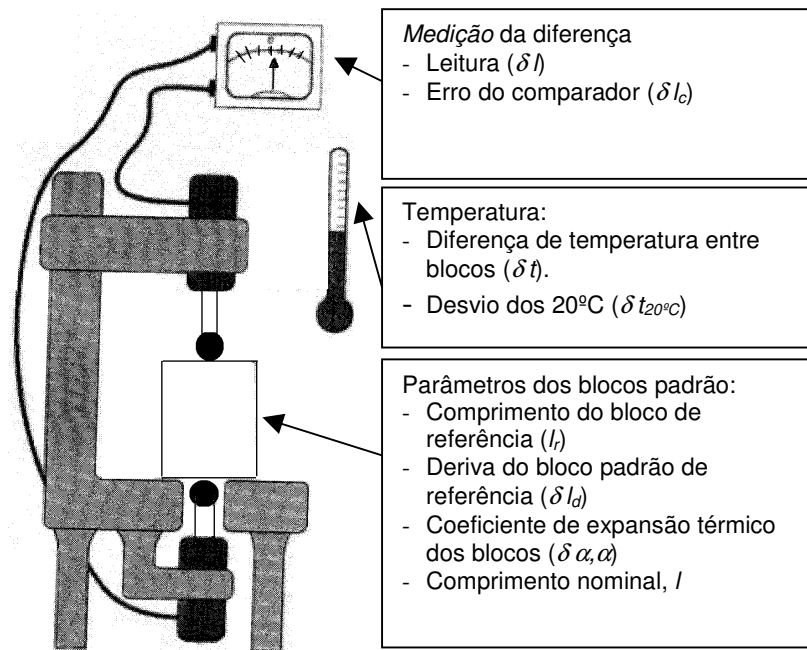
6.7.1. Modelização

O sistema SACBP está baseado no *método de medição* diferencial. No *método de medição* diferencial o comprimento do bloco padrão a medir é comparado com comprimento do bloco padrão de referência com o mesmo *valor nominal*. O valor medido, δl , resulta da diferença entre o comprimento do bloco padrão em *calibração*, l_x , e o comprimento do bloco padrão de referência, l_r . Correspondendo o comprimento l_x ao valor medido somado algebricamente ao comprimento do bloco padrão de referência, dado pela equação:

$$l_x = l_r + \delta l \quad (6.18)$$

Para modelização da operação de *medição* é necessário ter conhecimento sobre os elementos que estão envolvidos na *calibração*:

- Blocos padrão de referência: estabilidade dimensional, coeficiente de expansão térmica e valores de *calibração* por interferometria (apresentados em certificado de *calibração* 69188, “UKAS Calibration”, Anexo B);
- Blocos padrão em *calibração*: coeficiente de expansão térmica;
- Sistema SACBP: resultados de *calibração* segundo o documento EAL-G21 [7];
- Sistema de medição das condições ambientais: características (resultados de *calibração* apresentados no certificado LMT20045000270/10, ver Anexo B).

Figura 6.2 – Esquema descritivo dos factores que influenciam a *medição*

De acordo com o descrito na Figura 6.2 o comprimento l_x do bloco em *calibração* é dado por:

$$l_x = l_r + \delta l_d + \delta l + \delta l_c - l \times (\alpha \times \delta t + \delta \alpha \times \delta t_{20^\circ C}) + \delta l_v \quad (6.19)$$

Tabela 6.2 – Lista de símbolos

Símbolos	Unidades	Definição
l	mm	Comprimento nominal do bloco padrão.
l_x	mm	Comprimento do bloco padrão em <i>calibração</i> .
l_r	mm	Comprimento do bloco padrão de referência à temperatura de referência de 20 °C, de acordo com o certificado de <i>calibração</i> .
δl_d	mm	Alteração do comprimento do bloco padrão de referência desde a última <i>calibração</i> devido a sua estabilidade dimensional.
δl	mm	O valor medido resultante da diferença entre o comprimento do bloco padrão em <i>calibração</i> , l_x , e o comprimento do bloco padrão de referência, l_r
δl_c	mm	Erro do sistema SACBP.
α	°C ⁻¹	Média do coeficiente de expansão térmico dos blocos padrão.
δt	°C	Diferença de temperatura dos blocos.
$\delta \alpha$	°C ⁻¹	Diferença dos coeficiente de expansão térmico dos blocos padrão.
$\delta t_{20^\circ C}$	°C	Desvio da média da temperatura dos blocos e a temperatura de referência, 20 °C.
δl_v	mm	Correcção devida ao contacto dos LVDT's não ser efectuado no centro dos blocos padrão.

Formulação dos dados de entrada

I_x – Resultado

I - Comprimento nominal dos blocos padrão:

- Estimativa de entrada, x_i
Valor nominal dos blocos padrão

I_r - Comprimento do bloco padrão de referência: O comprimento do bloco padrão de referência juntamente com a incerteza de *calibração* é fornecido pelo certificado de *calibração* do conjunto dos blocos padrão de referência.

- Estimativa de entrada, x_i
Valor do certificado de *calibração* (69188, “UKAS Calibration”, ver exemplo no Anexo B)
- Incerteza padrão, $u(x_i)$
Tipo B distribuição normal
Incerteza expandida de calibração do certificado (69188, “UKAS Calibration”, ver exemplo no Anexo B
Factor de expansão dado no certificado ($k = 2$)
- Coeficiente de sensibilidade, c_i
 $c_i = 1$
- Graus de liberdade efectivos
50

δI_d - Alteração do comprimento do bloco padrão de referência desde a última *calibração* devido a sua estabilidade dimensional: A estabilidade dimensional do bloco padrão de referência é a propriedade referente à alteração máxima do comprimento ao longo do tempo em condições normais de utilização.

- Estimativa de entrada, x_i
0 mm
- Incerteza padrão, $u(x_i)$
Tipo B distribuição rectangular
Variação máxima (*grau* K): $\pm (0,02 + 0,25 \times 10^{-6} \times l) \text{ } \mu\text{m}$, com l em mm, baseada na norma ISO 3650
- Coeficiente de sensibilidade, c_i
 $c_i = 1$
- Graus de liberdade efectivos
 ∞

δI - O valor medido: O desvio obtido através da medição diferencial pelo sistema SACBP. Neste caso a avaliação poderia ser feita através da avaliação Tipo A, análise estatística da série de *medições* (por exemplo, 5 *medições*). Como a máquina é sujeita a *calibração* segundo a directiva EAL G-21 e são feitos vários ensaios onde se testam a sua repetibilidade e onde vários desvios padrão encontrados/calculados têm que ser iguais ou inferiores a 0,015 μm , admite-se para este caso um desvio padrão de 0,015 μm .

- Estimativa de entrada, x_i

O valor medido resulta da diferença entre o comprimento do bloco padrão em *calibração*, l_x , e o comprimento do bloco padrão de referência, l_r , (admite-se, por exemplo, para os cálculos do ponto 6.7.2): 0,00005 mm

- Incerteza padrão, $u(x_i)$

Tipo A

Desvio padrão: 0,015 μm

Número de leituras (n): 5

- Coeficiente de sensibilidade, c_i

$$c_i = 1$$

- Graus de liberdade efectivos

4

δI_c - Erro do sistema SACBP: O *sistema de medição* é submetido a *calibração* segundo a directiva EAL-G21, para verificação de cumprimento das suas especificações. Erro máximo admissível de $\pm 0,03 \mu\text{m}$

- Estimativa de entrada, x_i

0 mm

- Incerteza padrão, $u(x_i)$

Tipo B distribuição rectangular

Erro do *sistema de medição* SACBP: $\pm 0,03 \mu\text{m}$

- Coeficiente de sensibilidade, c_i

$$c_i = 1$$

- Graus de liberdade efectivos

∞

$\alpha = (\alpha_x + \alpha_r)/2$ - Média do coeficiente de expansão térmico dos blocos padrão: Baseado no certificado de *calibração* dos blocos padrão de referência e da informação do fabricante dos blocos em *calibração* (mesmo α) utiliza-se o coeficiente de expansão térmico linear do aço $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

- Estimativa de entrada, x_i
Coeficiente de expansão térmico (por exemplo do aço): $11,5E-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Incerteza padrão, $u(x_i)$
Tipo B distribuição rectangular
Variação do coeficiente: $\pm 1E-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Coeficiente de sensibilidade, c_i
 $c_i = L \times \partial t$
- Graus de liberdade efectivos
 ∞

$\delta t = t_x - t_r$ - Diferença de temperatura dos blocos: Perante os cuidados de *calibração*, em especial o tempo de estabilização térmico, assume-se que a temperatura dos blocos é igual à temperatura ambiente. A diferença da temperatura residual entre os blocos é estimada como sendo a incerteza de *calibração* associada ao *sistema de medição* de temperatura.

- Estimativa de entrada, x_i
Diferença entre blocos: $0 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Incerteza padrão, $u(x_i)$
Tipo B distribuição rectangular
Diferença de temperatura residual: $\pm 0,046 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Valor para o ponto 6.7.2, valor de certificado LMT20045000270/10, ver Anexo B)
- Coeficiente de sensibilidade, c_i
 $c_i = L \times \alpha$
- Graus de liberdade efectivos
 ∞

$\delta \alpha = \alpha_x - \alpha_r$ - Diferença dos coeficiente de expansão térmico dos blocos padrão: Tendo como base os dados sobre os coeficientes de expansão térmicos determina-se a sua diferença e estima-se a sua variação. Para os resultados apresentados no ponto 6.7.2 foi admitido que os blocos são do mesmo material, a diferença é $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e estimamos a variação em $\pm 2E-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

- Estimativa de entrada, x_i
Diferença de coeficiente de expansão térmico: $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Incerteza padrão, $u(x_i)$
Tipo B distribuição rectangular
Variação da diferença dos coeficientes: $\pm 2E-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Coeficiente de sensibilidade, c_i
 $c_i = L \times \delta t_{20^\circ\text{C}}$
- Graus de liberdade efectivos
 ∞

$\delta t_{20^{\circ}\text{C}} = (t_x - t_r)/2 - t_{20^{\circ}\text{C}}$ Desvio da média da temperatura dos blocos e a temperatura de referência.

20 °C: Admitindo que os blocos estão à mesma temperatura, com diferença residual (tratado no δt). Lê-se o desvio da temperatura em relação aos 20 °C no *sistema de medição* da temperatura.

- Estimativa de entrada, x_i

Diferença medida da temperatura para 20 °C: 0,1 °C (Valor para o ponto 6.7.2)

- Incerteza padrão, $u(x_i)$

Tipo B distribuição rectangular

Incerteza na medição da grandeza temperatura: $\pm 0,046$ °C (Valor para o ponto 6.7.2, valor de certificado LMT20045000270/10, ver Anexo B)

- Coeficiente de sensibilidade, c_i

$$c_i = L \times \delta \alpha$$

- Graus de liberdade efectivos

∞

δl_v - Correcção ao facto de o contacto dos LVDT's não se efectuar no centro do bloco padrão de

referência: Sabe-se de acordo com a norma ISO 3650 [4], que a tolerância para a variação do comprimento de blocos padrão *grau* K até 100 mm é 0,07 μm . Assumindo que esta variação ocorre na face de medição com um comprimento de 9 mm e que a medição do ponto central se faz com um desvio máximo de 0,5 mm do centro do bloco, estima-se, para esta situação, uma tolerância de 0,003 μm

- Estimativa de entrada, x_i

0 mm

- Incerteza padrão, $u(x_i)$

Tipo B distribuição rectangular

Tolerância: 0,003 μm

- Coeficiente de sensibilidade, c_i

$$c_i = 1$$

- Graus de liberdade efectivos

∞

No ponto 6.7.2 vai ser apresentado os resultados obtidos para a determinação da estimativa do *valor verdadeiro* do comprimento, l_x , e respectiva *incerteza expandida* de vários blocos padrão (5, 25, 50, 75 e 100 mm), tomando em consideração tudo o que foi dito neste ponto.

6.7.2. Apresentação de resultados

Tabela 6.3 – Estimativa do valor I_x e avaliação da *incerteza expandida de calibração* para o bloco padrão de 5 mm

	Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade v_i
	l (mm)	5 mm				
1	l_r (mm)	5,00001 mm	1,50E-05 mm	1	1,50E-02 μm	50
2	δl_d (mm)	0 mm	1,21E-05 mm	1	1,21E-02 μm	∞
3	δl (mm)	0,00005 mm	6,71E-06 mm	1	6,71E-03 μm	4
4	δl_c (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
5	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000115 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5,77E-07 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0 mm $^{\circ}\text{C}$	0,00E+00 μm	∞
6	δt ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	5,75E-05 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,53E-03 μm	∞
7	$\delta \alpha$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,15E-06 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,5 mm $^{\circ}\text{C}$	5,77E-04 μm	∞
8	$\delta t_{20^{\circ}\text{C}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,1 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00E+00 μm	∞
9	δl_v (mm)	0 mm	1,73E-06 mm	1	1,73E-03 μm	∞
		5,00006 mm			$u(y) = 0,027 \mu\text{m}$	$v_{ef} = 343$

Resultado: $L_x = 5,00006 \text{ mm}$

Incerteza expandida = $\pm 2,01 \times u(y) = \pm 0,054 \mu\text{m}$

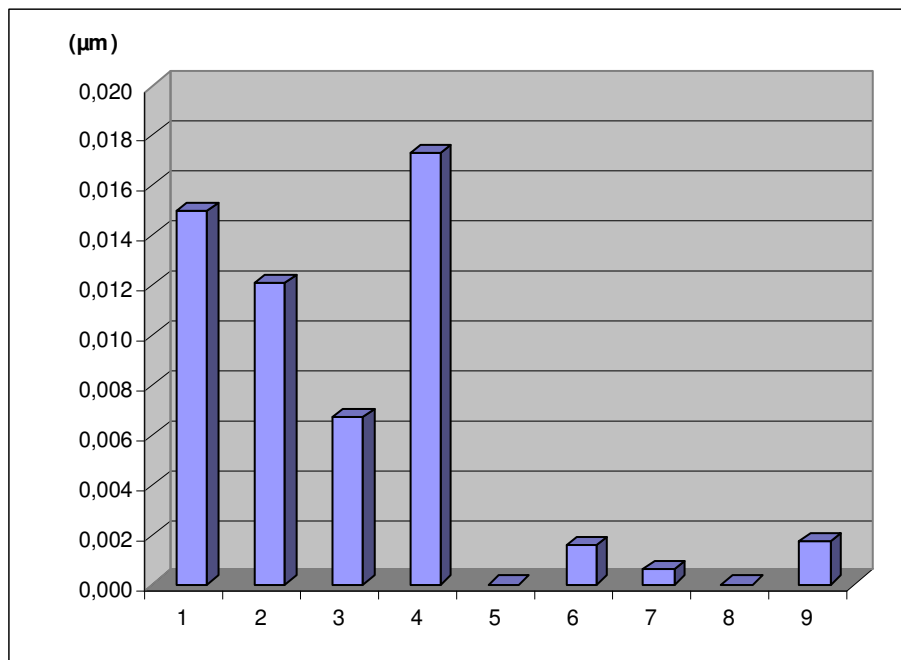


Gráfico 6. 1 - Peso das contribuições, $u_i(y)$, para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída y* - bloco padrão 5 mm

Tabela 6.4 – Estimativa do valor l_x e avaliação da *incerteza expandida de calibração* para o bloco padrão de 25 mm

	Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade v_i
	l (mm)	25 mm				
1	l_r (mm)	25,00000 mm	1,50E-05 mm	1	1,50E-02 μm	50
2	δl_d (mm)	0 mm	1,44E-05 mm	1	1,44E-02 μm	∞
3	δl (mm)	0,00005 mm	6,71E-06 mm	1	6,71E-03 μm	4
4	δl_c (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
5	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000115 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5,77E-07 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0 mm $^{\circ}\text{C}$	0,00E+00 μm	∞
6	δt ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0,000288 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	8,30E-03 μm	∞
7	$\delta \alpha$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,15E-06 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	2,5 mm $^{\circ}\text{C}$	2,89E-03 μm	∞
8	$\delta t_{20^{\circ}\text{C}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,1 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00E+00 μm	∞
9	δl_v (mm)	0 mm	1,73E-06 mm	1	1,73E-03 μm	∞
		25,00005 mm			$u(y) = 0,029 \mu\text{m}$	$v_{ef} = 473$

Resultado: $L_x = 25,00005 \text{ mm}$

Incerteza expandida = $\pm 2,01 \times u(y) = \pm 0,058 \mu\text{m}$

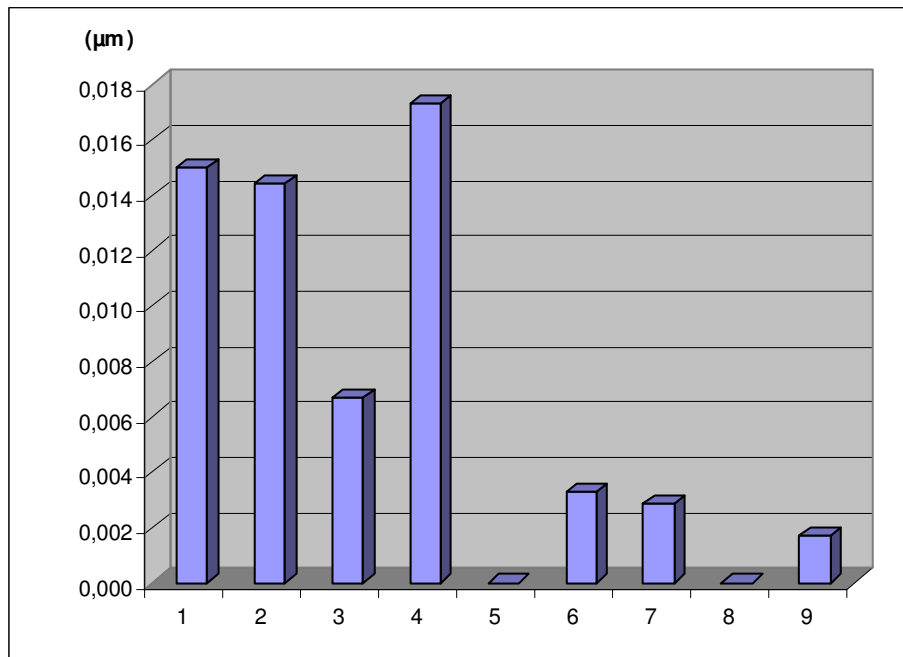
Gráfico 6.2- Peso das contribuições, $u_i(y)$, para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída y* - bloco padrão 25 mm

Tabela 6.5 – Estimativa do valor L_x e avaliação da *incerteza expandida de calibração* para o bloco padrão de 50 mm

	Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade v_i
	L (mm)	50 mm				
1	L_r (mm)	50,00001 mm	1,50E-05 mm	1	1,50E-02 μm	50
2	δl_d (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
3	δl (mm)	0,00005 mm	6,71E-06 mm	1	6,71E-03 μm	4
4	δl_c (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
5	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000115 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5,77E-07 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0 mm $^{\circ}\text{C}$	0,00E+00 μm	∞
6	δt ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0,000575 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,66E-02 μm	∞
7	$\delta \alpha$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,15E-06 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5 mm $^{\circ}\text{C}$	5,77E-03 μm	∞
8	$\delta t_{20^{\circ}\text{C}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,1 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00E+00 μm	∞
9	δl_v (mm)	0 mm	1,73E-06 mm	1	1,73E-03 μm	∞
		50,00006 mm			$u(y) = 0,034 \mu\text{m}$	$v_{ef} = 854$

Resultado: $L_x = 50,00006 \text{ mm}$

Incerteza expandida = $\pm 2,00 \times u(y) = \pm 0,068 \mu\text{m}$

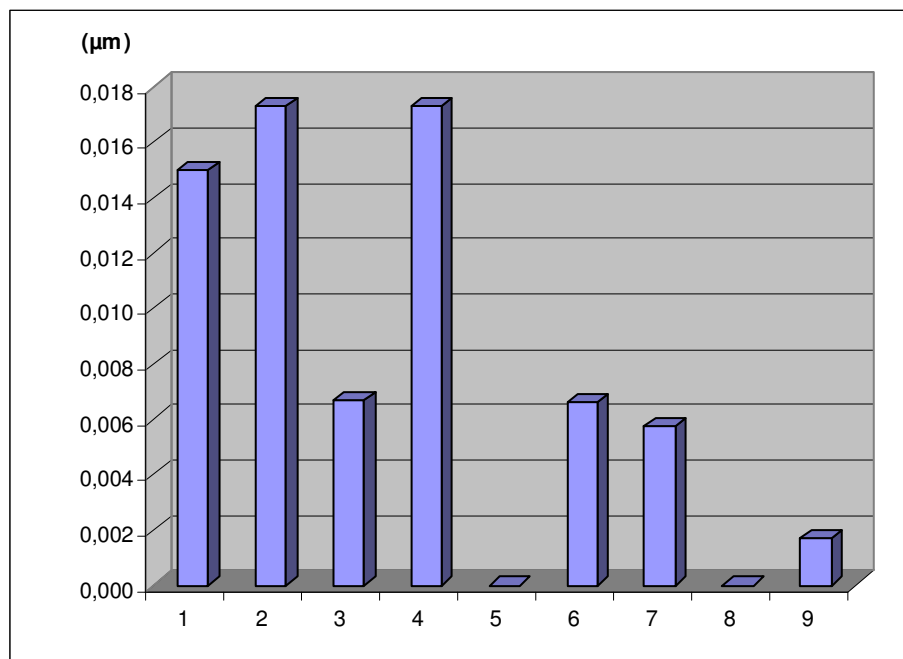
Gráfico 6.3 - Peso das contribuições, $u_i(y)$, para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída y* - bloco padrão 50 mm

Tabela 6.6 – Estimativa do valor l_x e avaliação da *incerteza expandida de calibração* para o bloco padrão de 75 mm

	Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade v_i
	l (mm)	75 mm				
1	l_r (mm)	75,00001 mm	1,50E-05 mm	1	1,50E-02 μm	50
2	δl_d (mm)	0 mm	2,02E-05 mm	1	2,02E-02 μm	∞
3	δl (mm)	0,00005 mm	6,71E-06 mm	1	6,71E-03 μm	4
4	δl_c (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
5	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000115 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5,77E-07 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0 mm $^{\circ}\text{C}$	0,00E+00 μm	∞
6	δt ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0,000863 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	2,49E-02 μm	∞
7	$\delta \alpha$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,15E-06 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	7,5 mm $^{\circ}\text{C}$	8,66E-03 μm	∞
8	$\delta t_{20^{\circ}\text{C}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,1 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00E+00 μm	∞
9	δl_v (mm)	0 mm	1,73E-06 mm	1	1,73E-03 μm	∞
		75,00006 mm			$u(y) = 0,040 \mu\text{m}$	$v_{ef} = 1645$

Resultado: $L_x = 75,00006$ mm

***Incerteza expandida* = $\pm 2,00 \times u(y)$ = $\pm 0,080 \mu\text{m}$**

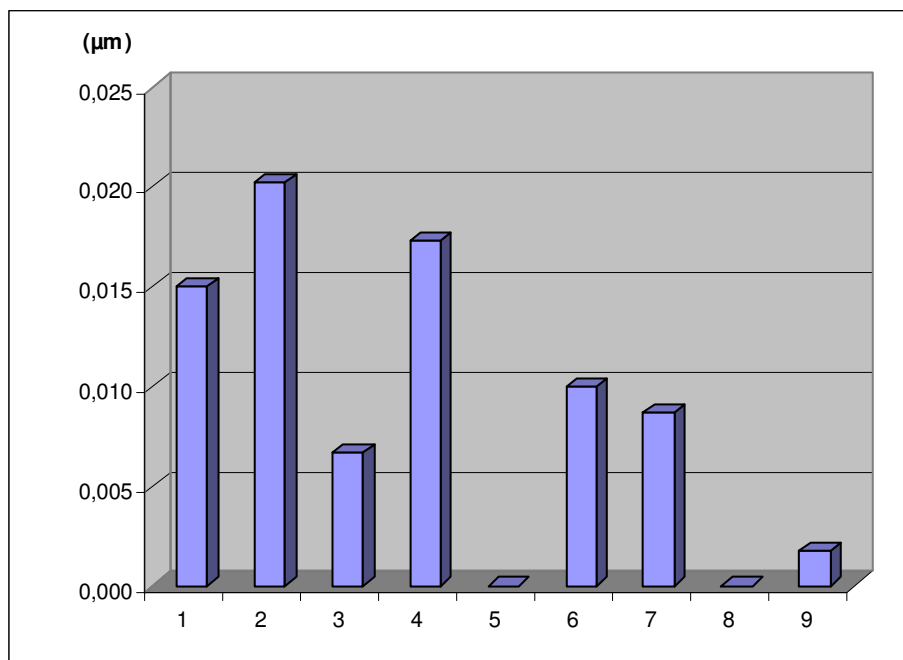
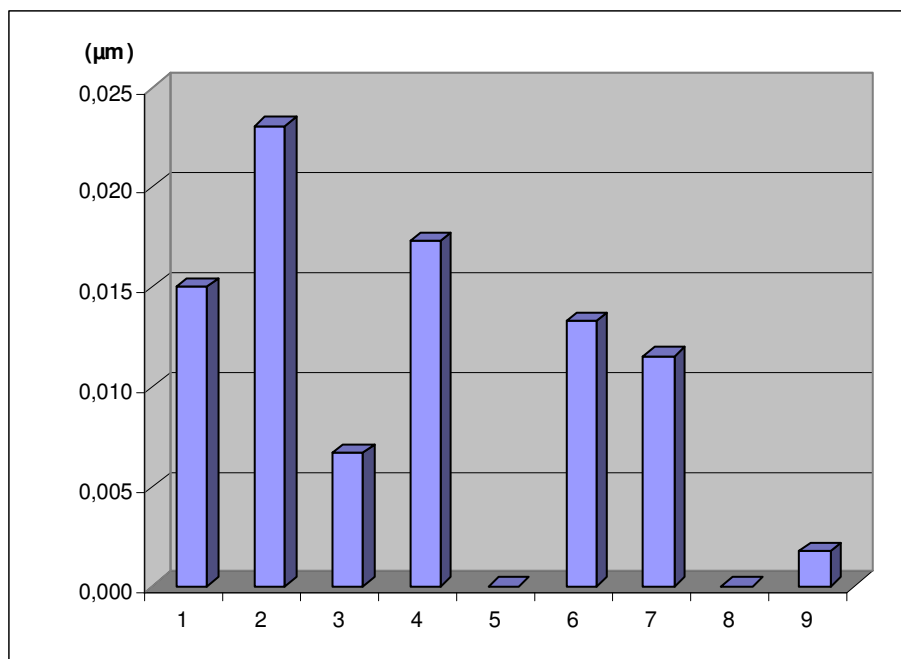
Gráfico 6.4 - Peso das contribuições, $u_i(y)$, para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída y* - bloco padrão 75 mm

Tabela 6.7 – Estimativa do valor L_x e avaliação da *incerteza expandida de calibração* para o bloco padrão de 100 mm

	Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade v_i
	L (mm)	100 mm				
1	L_r (mm)	99,9998 mm	1,50E-05 mm	1	1,50E-02 μm	50
2	δl_d (mm)	0 mm	2,31E-05 mm	1	2,31E-02 μm	∞
3	δl (mm)	0,00005 mm	6,71E-06 mm	1	6,71E-03 μm	4
4	δl_c (mm)	0 mm	1,73E-05 mm	1	1,73E-02 μm	∞
5	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000115 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	5,77E-07 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0 mm $^{\circ}\text{C}$	5,77E-03 μm	∞
6	δt ($^{\circ}\text{C}$)	0 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0,00115 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	3,32E-02 μm	∞
7	$\delta \alpha$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,15E-06 $^{\circ}\text{C}^{-1}$	10 mm $^{\circ}\text{C}$	1,15E-02 μm	∞
8	$\delta t_{20^{\circ}\text{C}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	0,1 $^{\circ}\text{C}$	2,66E-02 $^{\circ}\text{C}$	0 mm $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00E+00 μm	∞
9	δl_v (mm)	0 mm	1,73E-06 mm	1	1,73E-03 μm	∞
		100,0003 mm			$u(y) = 0,047 \mu\text{m}$	$v_{ef} = 3106$

Resultado: $L_x = 100,0003 \text{ mm}$

Incerteza expandida = $\pm 2,00 \times u(y) = \pm 0,094 \mu\text{m}$

Gráfico 6.5 - Peso das contribuições, $u_i(y)$, para a *incerteza padrão* associada à estimativa da *grandeza de saída y* - bloco padrão 100 mm

Nestes 5 exemplos foram mantidos os valores dos parâmetros, excepto os relativos ao comprimento dos blocos padrão.

Pela análise dos diferentes gráficos das contribuições dos pesos das componentes de incerteza, como era expectável, verifica-se que os resultados dos parâmetros dependentes da temperatura são directamente proporcionais à dimensão dos blocos padrão. Neste sentido, as melhorias introduzidas na medição da temperatura no ambiente de trabalho (zona de medição), tornam-se um factor importante para a melhoria e confiança na incerteza expandida da *calibração*. Considerando que os trabalhos de calibração podem decorrer sem o acompanhamento do operador, o efeito de alterações de temperatura no ambiente de trabalho, se estabilizadas, é automaticamente contabilizado e corrigido no resultado final pela aplicação desenvolvida.

6.8. Melhoria da incerteza de *calibração*

A melhor *incerteza expandida de calibração* oficial do CATIM é:

$$\pm (0,06+0,0006 \times L) \mu\text{m}, \text{ com } L \text{ (valor nominal do bloco padrão) em mm} \quad (6.20)$$

Tendo em conta as incertezas calculadas no ponto 6.7.2 pode ser construída a Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – *Incertezas expandidas da calibração* dos blocos padrão

Comprimento do bloco padrão (mm)	<i>Incerteza expandida de calibração</i> (μm)
5	$\pm 0,054$
25	$\pm 0,058$
50	$\pm 0,068$
75	$\pm 0,080$
100	$\pm 0,094$

Podemos através de uma regressão linear determinar uma equação que represente as incertezas indicadas na Tabela 6.3:

$$\pm (0,049+0,00043 \times L) \mu\text{m}, \text{ com } L \text{ (valor nominal do bloco padrão) em mm} \quad (6.21)$$

A regressão foi determinada de acordo com o Gráfico 6.6:

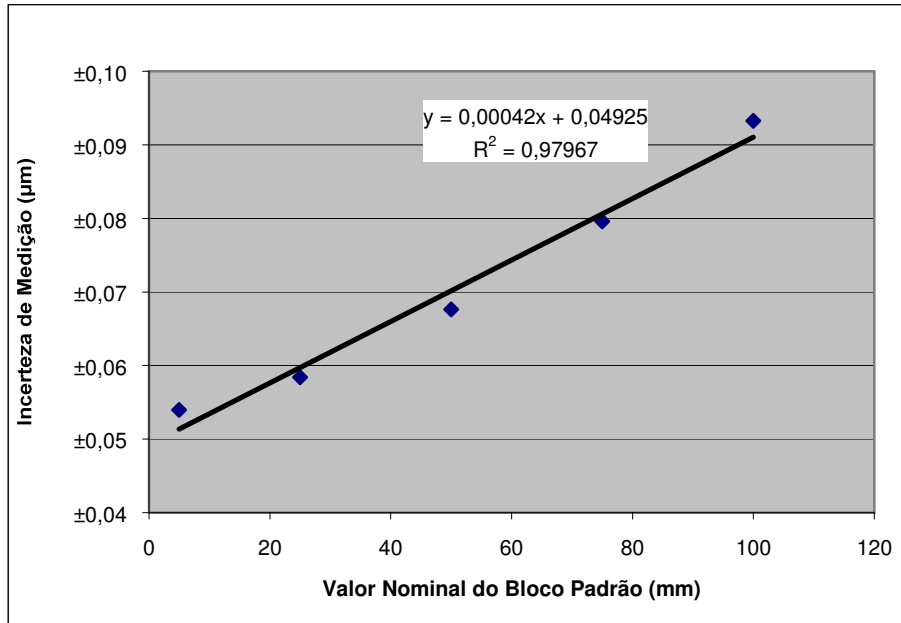


Gráfico 6.6 – Regressão linear para determinação da equação da incerteza

Como se pode concluir a *incerteza expandida* calculada para as condições em que se encontra o sistema SACBP a trabalhar é menor o que a melhor *incerteza expandida* determinada antes da implementação das alterações tratadas na dissertação (por exemplo, para o bloco padrão de 100 mm diminui de $\pm 0,12 \mu\text{m}$ para $\pm 0,094 \mu\text{m}$).

Como observação final aos resultados obtidos importa salientar a melhoria registada no valor da estimativa da *incerteza expandida* na *calibração* dos blocos padrão destacando-se, para além disso, o grau de confiança com que se tornou possível a determinação desses valores. O processo automático de leitura da grandeza de influência – a temperatura, a contínua observância da sua estabilidade ao longo do processo de calibração no ambiente de trabalho (zona de medição) e a compensação implementada no modelo de cálculo, são os principais factores que contribuem para a confiança que agora acompanha a estimativa da *incerteza expandida* associada às *calibrações* dos blocos padrão com o sistema SACBP.

Tomando como referência os valores oficiais de instituições europeias de nível primário para a estimativa da *incerteza expandida* associada às *calibrações* dos blocos padrão e, tomando para elemento de comparação a relativa a blocos padrão com $L = 100 \text{ mm}$, encontra-se um valor de $0,14 \mu\text{m}$ no LNE onde as *calibrações* são realizadas com um sistema equivalente [22]. No NPL e no IPQ os valores são da ordem de $0,03 \mu\text{m}$ inferiores [23 e 24] para *calibrações* realizadas com sistemas interferométricos, não comparáveis em rigor nem em custo ao sistema

SACBP. De notar que as *calibrações* por sistemas interferométricos estão no patamar superior da cadeia de *rastreabilidade* no domínio dimensional.

É inquestionável que para Instituições dedicadas à prestação de serviços neste âmbito, a melhor capacidade (melhor *incerteza de medição*) assume, necessariamente, importância do ponto de vista concorrencial.

Finalmente, considerando os blocos padrão como partes integrantes de *sistemas de medição*, na perspectiva do cliente, melhores valores na estimativa da *incerteza expandida* associada à *calibração* dos blocos padrão contribuirá com um ganho indiscutível na propagação de incerteza na cadeia de *rastreabilidade*.

7. Futuros desenvolvimentos

O sistema automático de *calibração* de blocos padrão (SACBP) permite realizar o controlo das funções e sequências de posicionamento, o armazenamento da informação dos blocos padrão de referência e dos dados das *medições*. Existe a possibilidade de tornar o SACBP num sistema aberto ao nível do controlo, da gestão da informação e de alterações de parâmetros normativos. Para tal identificou-se como interessante a substituição do actual sistema de controlo.

Assim, neste capítulo será feita a abordagem sobre a viabilidade da substituição do sistema de controlo, tendo como objectivo principal fornecer sugestões, para uma possível prossecução do trabalho até agora realizado e para possíveis actualizações a este nível. No ponto 7.1 será feita a apresentação das principais unidades do sistema SACBP, com o objectivo de reunir informações úteis para o conhecimento dos seus elementos.

Foi ainda avaliado uma solução para o desenvolvimento de um sistema automático para medição de planeza das faces de medição dos blocos padrão. Foi ponderada e testada uma solução baseada em visão artificial (LabVIEW e MANTO TEACH), não tendo os resultados sido satisfatórios como consequência do elevado grau de subjectividade envolvido nesse método de análise.

7.1. Apresentação dos principais unidades do sistema SACBP

Neste ponto serão apresentadas e descritas as principais unidades constituintes do sistema e que de alguma forma estão envolvidas no seu controlo.

As unidades que constituem o SACBP são o sistema mecânico de movimentação, a consola de controlo, o *sistema de medição* TESAMODUL, a unidade pneumática de recolha dos LVDT's e software de controlo.

O sistema mecânico de movimentação realiza vários movimentos para colocar os blocos padrão na posição de *calibração*, isto é, no local onde os LVDT's fazem as várias *medições* aos blocos padrão: movimento de rotação do carrossel, movimento linear do braço posicionador e movimentos lineares da mesa de posicionamento de precisão. O carrossel é movimentado por um mecanismo de indexação que é accionado pelo motor M_5 (Figura 7.1). O parafuso sem fim, accionado pelo motor passo-a-passo M_1 , é responsável pelo movimento do braço posicionador e, consequentemente, pelo movimento dos blocos padrão segundo o eixo X

na mesa de posicionamento de precisão (Figura 7.1 e 7.2). Nesta mesa, o posicionamento segundo Y é feito por intermédio de um parafuso sem fim accionado pelo motor passo-a-passo M_2 (Figura 7.1 e 7.2).

O LVDT superior efectua um movimento linear na coluna vertical (eixo Z) para realizar as *medições*. Este movimento permite posicionar o LVDT em altura de acordo com o *valor nominal* do bloco padrão a calibrar. O seu deslocamento é efectuado por intermédio de um parafuso sem fim accionado pelo motor passo-a-passo M_3 com elevada exactidão de posicionamento e possuidor de um codificador linear (Figura 7.1 e 7.2). A fixação do LVDT na cota de medição é garantida automaticamente através de um travão accionado pelo motor passo-a-passo M_4 (Figura 7.1).

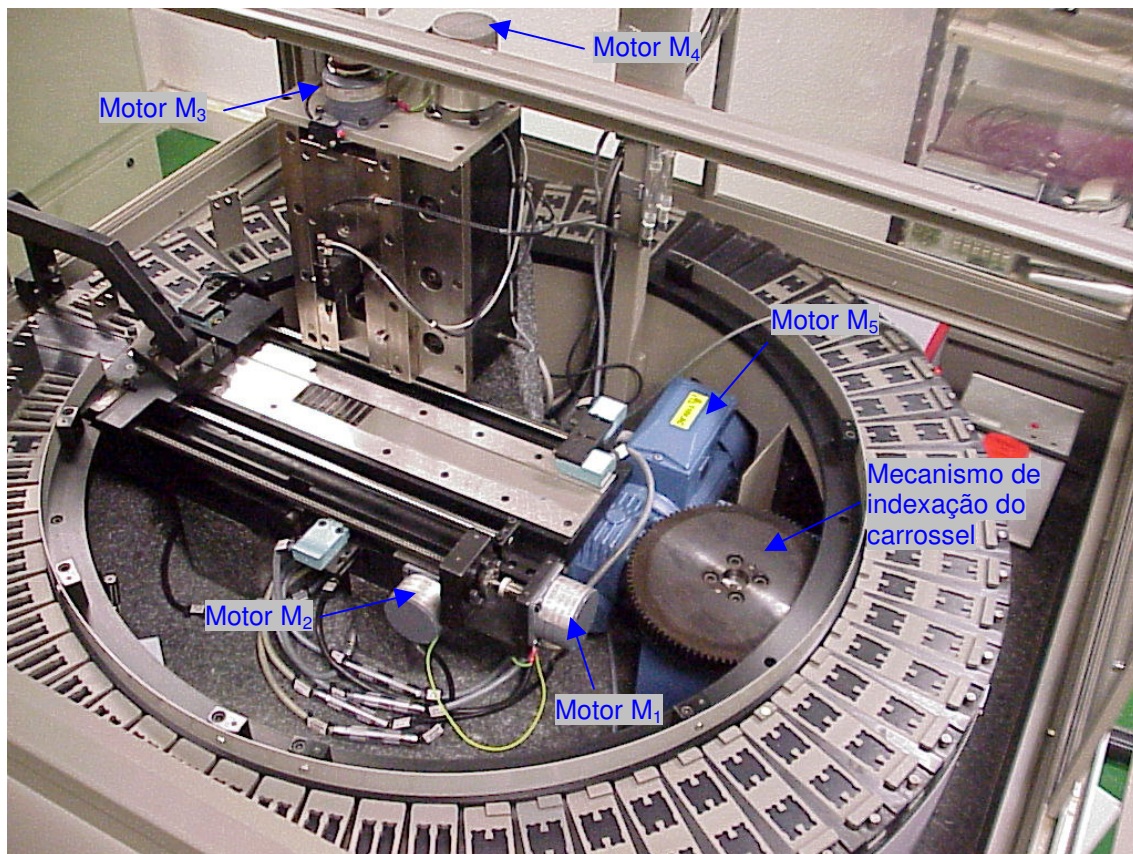


Figura 7.1 – Elementos accionadores do sistema SACBP

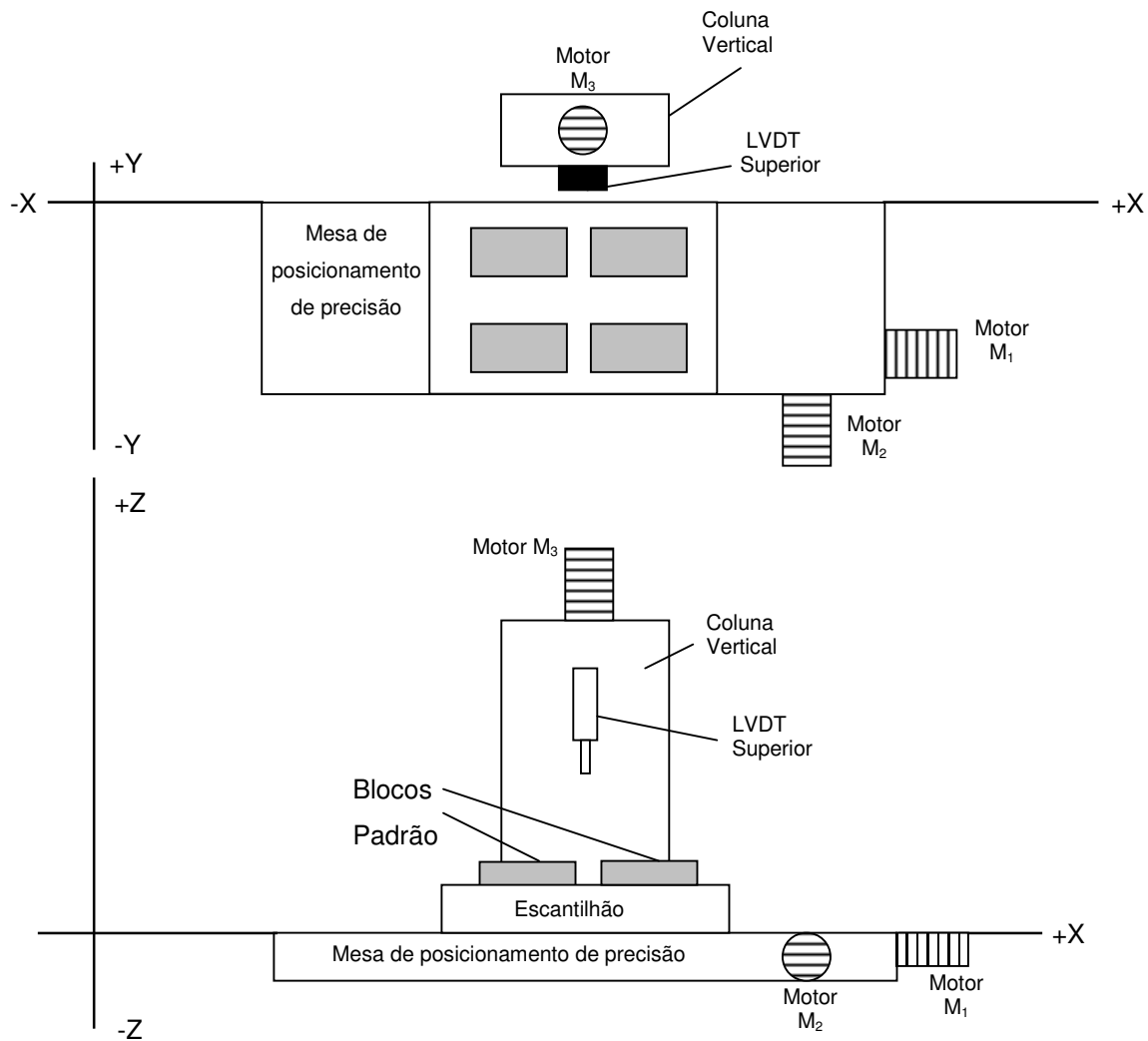


Figura 7.2 – Esquema de localização dos elementos e representação dos eixos de movimento (X, Y e Z)

A consola de controlo é constituída por um computador, um quadro eléctrico, uma unidade de microposicionamento 3D de motores passo-a-passo “Parker Digiplan” e pelo controlador AT6400 da “Parker Compumotor”.

A unidade de medição TESAMODUL é constituída por um dispositivo indicador e por dois LVDT’s.

A unidade pneumática de recolha dos LVDT’s, U_{PR} , é constituída por uma bomba de vácuo e o respectivo circuito pneumático e tem como função retrainr os LVDT’s durante o transporte e posicionamento para evitar colisões.

O esquema da Figura 7.3 mostra como os vários elementos constituintes do sistema SACBP estão ligados entre si.

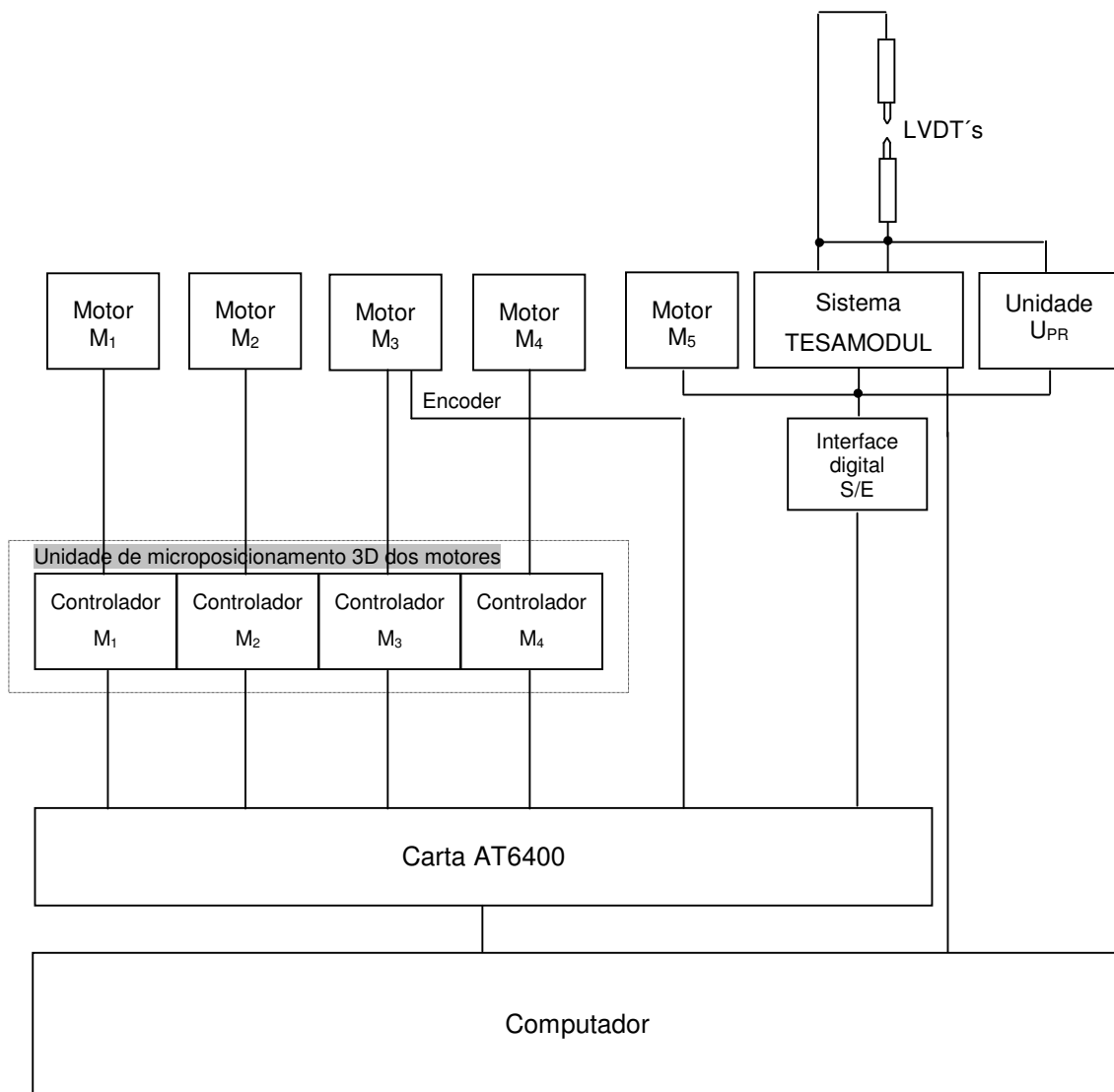


Figura 7.3 – Esquema de ligação entre os elementos do sistema SACBP

O programa de controlo do sistema SACBP permite parametrizar as funções e sequências de posicionamento, armazenar a informação dos blocos padrão de referência e dos dados das *medições* já realizadas. Consegue-se, também, configurar os parâmetros da unidade de medição “TESAMODUL”.

Para ajudar na identificação dos elementos mais importantes, que compõem as várias unidades, são fornecidas as tabelas seguintes onde se pode encontrar as descrições, os fabricantes e as respectivas referências.

Tabela 7.1 – Elementos accionadores

Símbolo	Descrição	Fabricante	Referência Fabricante
M ₁	Motor passo-a-passo do eixo X	M.A.E.	HY2002232190AB
M ₂	Motor passo-a-passo do eixo Y	STEBON	FDBL6011500515
M ₃	Motor passo-a-passo do eixo Z	STEBON	FDBL6011500515
M ₄	Motor passo-a-passo para accionamento do travão	M.A.E.	HY2002232190AB
M ₅	Motor de indexação do carrossel	SOPAP (França)	S27466-11-90ZM
U _{PR}	Unidade pneumática de recolha dos LVDT's	KNF NEUBERGER	N73KN.18-Volts

Tabela 7.2 – Elementos controladores

Símbolo	Descrição	Fabricante	Referência Fabricante
---	Controlador dos motores (sinal)	DIGIPLAN	SDC MOTHER
---	Controlador dos motores (potência)	DIGIPLAN	SD12
---	Carta AT6400	DIGIPLAN	AT6400-AUX1

Tabela 7.3 – Elementos de medição

Símbolo	Descrição	Fabricante	Referência Fabricante
---	TESA MODUL	TESA	41.90190
---	LVDT superior	TESA	32.90076
---	LVDT inferior	TESA	32.90075

7.2. Proposta de resolução

A proposta de resolução consiste na substituição do software de controlo, actualmente baseado no sistema MS-DOS, por um software baseado em LabVIEW em ambiente WINDOWS usando para isso a biblioteca “Motion Toolbox” da Parker. Esta biblioteca permite controlar a partir do software LabVIEW, o hardware actualmente existente possibilitando, desta forma, desenvolver um novo sistema aberto para controlo do SACBP.

A biblioteca “Motion Toolbox” é constituída por um conjunto de instrumentos virtuais desenvolvidos em ambiente LabVIEW para interface com a placa de controlo de movimento incorporada no sistema SACBP.

A biblioteca “Motion Toolbox” suporta a carta AT6400 e fornece a possibilidade de explorar as seguintes capacidades:

- Configuração dos parâmetros de indexação, codificação, controlo e fins de curso;
- Controlo do movimento incluindo velocidade, aceleração, desaceleração, avanço, paragem, etc.;
- Controlo das linhas de entrada/saída.

Deste modo será possível desenvolver uma aplicação aberta com uma interface amigável com o utilizador em ambiente WINDOWS.

Paralelamente, na procura de informação adicional sobre processos de actualização de sistemas semelhantes ao SACBP foram estabelecidos alguns contactos com entidades envolvidas no desenvolvimento e utilização destes sistemas. Em particular sabe-se que o Laboratoire National D’ Essais (França) – LNE se encontra, igualmente, a actualizar um sistema igual ao SACBP do CATIM. Contudo a solução adoptada não é conhecida até terminar a fase de validação das características metrológicas.

Serão, também, disponibilizados no Anexo C os contactos de várias entidades que estão envolvidas no desenvolvimento e utilização destes sistemas.

A solução apontada apresenta, no ponto de vista do autor deste trabalho, diversas vantagens:

- não implica alteração de hardware;
- a imobilização do sistema SACBP limita-se apenas ao tempo de teste do software desenvolvido;
- durante a fase referida de desenvolvimento do software o sistema poderá continuar a operar normalmente;
- a solução é económica (< € 2000) e o trabalho de programação está ao alcance das capacidades internas do CATIM;
- caracteriza-se por ser uma solução aberta de fácil configuração a novos parâmetros normativos;
- a totalidade do trabalho desenvolvido no contexto desta tese será integrável nesta solução apontada.

8. Conclusões

✓ Problema estudado

A elaboração desta dissertação teve como alicerce várias acções concebidas e implementadas para a melhoria do desempenho e da segurança do sistema automático de *calibração* de blocos padrão (SACBP) do CATIM.

Aliadas a estas acções, foram feitas reflexões respeitantes à forma e ao modo de implementação das várias soluções, bem como estudos que incidiram sobre os blocos padrão, a sua *calibração* e o cálculo da *incerteza expandida* de medição.

Este trabalho permitiu à instituição iniciar uma prática de actualização tecnológica de equipamentos ligados à metrologia recorrendo às suas capacidades e conhecimentos. Ao autor deste trabalho, e responsável pela área da metrologia dimensional, permitiu alargar o conhecimento para a resolução de projectos desta natureza, bem como aprofundar questões sobre a materialização mais exacta da grandeza comprimento utilizada na metrologia dimensional, destinada a definir e a conservar um determinado comprimento (blocos padrão). Finalmente, este documento compila de forma sistematizada toda a informação relevante (conceitos, características, utilização, conservação, *calibração*, etc.) associada aos blocos padrão para futura referência.

✓ Perspectiva seguida

Para introduzir melhorias no sistema automático de *calibração* de blocos padrão (SACBP) foi necessário, antes do mais, ponderar as suas limitações ao nível da segurança, da monitorização das condições ambientais no ambiente de trabalho (zona de medição) e no processamento dos dados de *calibração* e elaboração do respectivo certificado.

Foram apresentadas as propostas de solução para a melhoria do sistema SACBP, nos respectivos capítulos, com o objectivo de mostrar a forma e o modo de implementação e fazer a adequação dessas soluções às exigências normativas, recomendações e orientações da literatura especializada.

✓ Soluções encontradas e temas abordados

Foram descritas as várias acções concebidas e implementadas para a melhoria do desempenho e segurança do sistema (SACBP):

- A melhoria do nível de Segurança do Sistema foi conseguida através da incorporação de um sistema concebido para fornecer a informação sobre a incorrecta introdução de blocos padrão. Com esta acção pretendeu-se prevenir o dano dos elementos mais sensíveis, como o LVDT superior e os vários acessórios de posicionamento (*escantilhões*, guias...), procurando evitar situações de acidente ocorridas no passado;
- Associado às condições ambientais (temperatura e humidade), criou-se um sistema capaz de traduzir as necessidades impostas de medição das mesmas e desenvolveu-se uma aplicação amigável com o utilizador para as monitorizar e registar;
- Para o processamento automático dos dados de *calibração* desenvolveu-se uma aplicação para a aquisição dos valores de temperatura e humidade do ambiente de trabalho do SACBP e para o tratamento de dados de *calibração*, que permitiu a implementação de um procedimento sistemático e automático com grandes vantagens em termos de tempo despendido, ausência de erros humanos e melhoria da *incerteza expandida*.

Foram abordados, entre outros, temas importantes ligados aos blocos padrão:

- Foi feita a descrição do sistema de *calibração* automático de blocos padrão (SACBP) e apresentado o procedimento de *calibração*, segundo a norma ISO 3560 [4];
- Para a *incerteza de medição* foram apresentados todos os conceitos e informações para o seu cálculo e apresentados os resultados dos valores obtidos da *incerteza expandida de medição*, contabilizando a contribuição das implementações para a melhoria do desempenho do SACBP.

✓ Resultados obtidos

Ao nível da segurança implementaram-se alterações no sistema SACBP que privilegiaram a prevenção e que têm como principal objectivo, portanto, diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes, optimizando o funcionamento do sistema.

A criação dum *sistema de medição* e registo das condições ambientais no ambiente de trabalho trouxe melhorias substanciais ao processo de *calibração* dos blocos padrão permitindo obter um conhecimento detalhado da sua evolução ao longo do tempo. Simultaneamente, permitiu ter

acesso à informação, em tempo real, sobre as condições de temperatura durante a *calibração*. No passado, parte dessa informação era baseada em estudos de estabilidade e uniformidade das condições ambientais das áreas envolvidas na *calibração* obtidas por amostragem manual. A melhoria da produtividade e a diminuição da probabilidade de ocorrência de erros advindos da introdução da informação pelo operador foram conseguidas através do uso de software especificamente desenvolvido para o processamento automático dos dados de *calibração* e elaboração do respectivo certificado. Há factores que, quando comparados com o procedimento anterior de elaboração do certificado, demonstram as grandes vantagens de utilização da aplicação desenvolvida: melhor organização e facilidade de acesso à informação, criação de restrições de acesso à actualização dos dados sobre a *rastreabilidade* dos blocos padrão de referência e à formatação do próprio certificado. De facto, houve um aumento significativo na produtividade. Com esta aplicação conseguiu-se reduzir, em média, 20% do tempo gasto no processo de *calibração*.

✓ Limitações do trabalho desenvolvido

O controlo das funções e sequências de posicionamento, bem como o armazenamento da informação dos blocos padrão de referência e dos dados das *medições*, é feito pela aplicação de origem. Para tornar o sistema SACBP aberto ao nível do controlo, da gestão da informação e de alterações futuras de parâmetros normativos, identificou-se como interessante a substituição do actual sistema de controlo. Contudo, devido à sua complexidade e à paragem obrigatória do sistema (necessariamente prolongada), este aspecto não foi possível de realizar no âmbito deste trabalho.

✓ Sugestões para futuros desenvolvimentos

Como sugestão para uma possível prossecução deste trabalho, identificou-se como interessante a substituição do actual sistema de controlo. Encerram-se estas conclusões esclarecendo que esta dissertação não poderia ser “fechada”, mas antes deixada em “aberto”, constituindo deste modo um ponto de partida para futuros melhoramentos e estudos sobre a *calibrações* de blocos padrão que envolvam o sistema automático de *calibração* de blocos padrão SACBP ou outros *sistemas de medição* idênticos.

Bibliografia

- [1] IPQ, “Vocabulário Internacional de Metrologia, Termos Fundamentais e gerais”, 2ª Edição, 1996

- [2] IPQ, “Manual Prático para a Certificação e Gestão da Qualidade com Base nas Normas ISO 9000:2000”, 2002

- [3] Norma ISO 10012 – “Measurement management systems – Requirements for measurement processes and equipment”, First edition 2003

- [4] Norma ISO 3560 – “Geometrical product specifications (GPS) – Length standards – Gauge blocks”, 1998

- [5] Simões Morais, “Desenho Técnico Básico“

- [6] Norma ISO 6507-1 – “Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method”, 1997

- [7] Directiva EAL-G21 (“Calibration of Gauge Blocks Comparators”), 1996.

- [8] Carlos Gonzáles e Ramón Zeleny, “Metrología” McGraw – Hill Interamericana de México, SA, 1995

- [9] Francis T. Farago, Mark A. Curtis, “Handbook of Dimensional Measurement”, Third Edition, Industrial Press Inc., 1994

- [10] Ted Doiron and John Beers, "The gauge block handbook"

- [11] Recomendação CNQ 5/2001, "Condições ambientais em laboratórios de *calibração*", 2002

- [12] ISO 1 "Geometrical Product Specifications (GPS) - Standard reference temperature for geometrical product specification and verification", 2002

- [13] John G. Webster, "The Handbook Measurement, Instrumentation and Sensor", 1999

- [14] AFNOR , "Métrologie, Gérer et maîtriser les processus et les équipements de mesure", 2003

- [15] ISO, "ISO Standards Handbook, Technical drawings", 1991

- [16] AFNOR, "Recueil Normes, Spécification géométrique des produits (GPS)", 11^a édition AFNOR, Tome 1, 2 e 3, 2002

- [17] Directiva EAL-G12, "Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards", 1994

- [18] Directiva EA-4/02, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration", 1999

- [19] Norma NP EN ISO/IEC 17025: 2000 "Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e *calibração*.", 2000

- [20] Simões Morais, “Desenho Técnico Básico”, 22^ª edição 1999

- [21] ISO Standards Handbook, “Technical drawing”, second edition 1991

- [22] <http://www.lne.fr>

- [23] <http://www.npl.co.uk>

- [24] <http://www.ipq.pt>

Anexo A

Carta de interpretação de *planeza* e tolerâncias

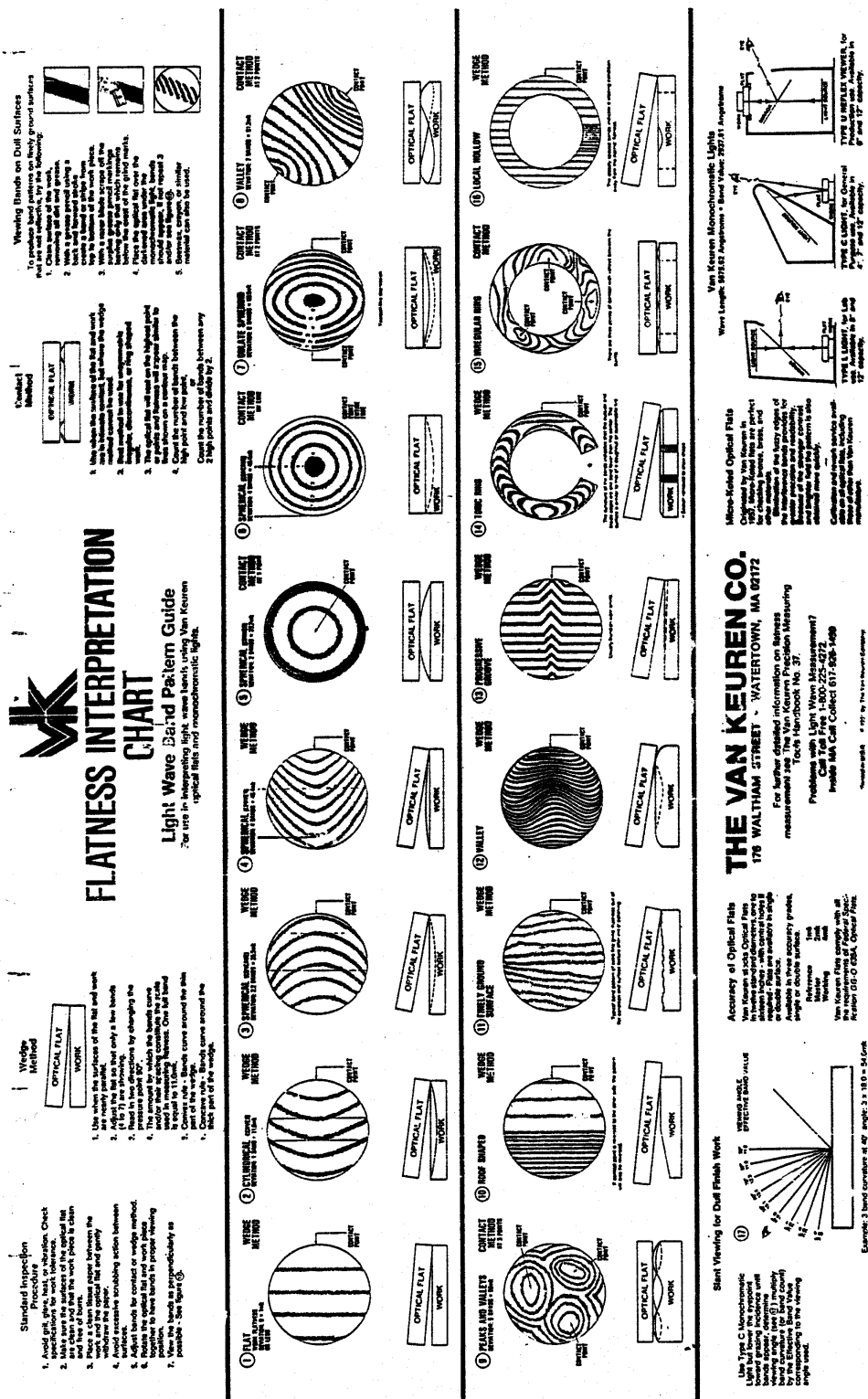


Figura A.1 – Exemplo de carta de interpretação de *planeza*

Tabela A.1– Tolerância de *planeza*, t_f

Comprimento Nominal, l_n (mm)	Tolerância de planeza, t_f (μm)			
	<i>Grau</i>			
	K	0	1	2
$0,5 \leq l_n \leq 150$	0,05	0,1	0,15	0,25
$150 < l_n \leq 500$	0,1	0,15	0,18	0,25
$500 < l_n \leq 1000$	0,15	0,18	0,2	0,25

Tabela A.2 – Limites dos desvios, t_e , do comprimento de todos os pontos em relação ao comprimento nominal, l_n , e tolerância, t_v , da variação dos comprimentos

Comprimento Nominal l_n (mm)	<i>Grau K</i>		<i>Grau 0</i>		<i>Grau 1</i>		<i>Grau 2</i>	
	$\pm t_e$ (μm)	t_v (μm)	$\pm t_e$ (μm)	t_v (μm)	$\pm t_e$ (μm)	t_v (μm)	$\pm t_e$ (μm)	t_v (μm)
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35
$100 < l_n \leq 150$	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,2	1,6	0,4
$150 < l_n \leq 200$	1	0,09	0,5	0,16	1	0,25	2	0,4
$200 < l_n \leq 250$	1,2	0,1	0,6	0,16	1,2	0,25	2,4	0,45
$250 < l_n \leq 300$	1,4	0,1	0,7	0,18	1,4	0,25	2,8	0,5
$300 < l_n \leq 400$	1,8	0,12	0,9	0,2	1,8	0,3	3,6	0,5
$400 < l_n \leq 500$	2,2	0,14	1,1	0,25	2,2	0,35	4,4	0,6
$500 < l_n \leq 600$	2,6	0,16	1,3	0,25	2,6	0,4	5	0,7
$600 < l_n \leq 700$	3	0,18	1,5	0,3	3	0,45	6	0,7
$700 < l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5	6,5	0,8
$800 < l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5	7,5	0,9
$900 < l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2	0,4	4,2	0,6	8	1

Anexo B

Certificados de calibração



Rua das Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Certificado de Calibração Laboratório de Metrologia - Dimensional

2004-07-09

CERTIFICADO Nº LMD20045003619/30

Página 1 de 4

CLIENTE: CATIM - LABORMET
RUA DOS PLÁTANOS, 197
4100-414 PORTO

DESCRIÇÃO: Caixa de 87 blocos padrão de Aço.

Marca : MITUTOYO
Modelo : 516-946
Grau Nominal: 1

Nº Série : 004939
Ref.Interna: 1574

EQUIPAMENTO UTILIZADO:

Calibrador de blocos padrão, MAHR, CATIM nº 85.04081. Blocos padrão CARY grau K, de aço, CATIM nº 00.50478, rastreáveis a Select Calibration Laboratories (UKAS CALIBRATION). Plano óptico, marca MAHR, CATIM nº 1621, rastreável ao Instituto de Soldadura e Qualidade. Fonte de Luz monocromática, TESA-RSD, CATIM nº 89.40136.

OPERAÇÕES EFECTUADAS :

Calibração segunda a norma ISO 3650.
Calibração diferencial em 5 pontos das faces de medida (centro + 4 cantos). O posicionamento dos blocos de comprimento inferior ou igual a 5,5 mm foi efectuado colocando a face que contém as inscrições voltada para cima, e nos restantes com as inscrições voltadas para o operador e com a face esquerda para baixo.
Foi também efectuado um controlo de planeza às faces de medida utilizando um plano óptico.

Todas as medições foram efectuadas em ambiente controlado a $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e a $(45 \pm 10)\%$.

RESULTADOS OBTIDOS:

Os desvios medidos em relação ao comprimento nominal, o controlo de planeza, a classificação dos blocos padrão de acordo com a norma ISO 3650 e a incerteza encontram-se na página 2.

Data de Calibração: 2004-07-09

O TÉCNICO

(Sérgio Vidinha)

O RESPONSÁVEL TÉCNICO

(Pedro Frutuoso)



Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.1 – Certificado de *calibração* de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 1ª página



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Continuação do Certificado de Calibração Laboratório de Metrologia - Dimensional

2004-07-09

CERTIFICADO Nº LMD20045003619/30

Página 2 de 4

DESVIOS OBTIDOS EM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO NOMINAL

Temperatura de referência: 20 °C
Coeficiente de expansão linear: Assumido como 11,5 E-6 / °C

Comprimento Nominal (mm)	Nº Série	Desvio do Ponto Central (µm)	Máximo Desvio do V. Nominal (µm)	Variação dos Pontos Medidos (µm)
0,5	20969	0,00	+0,06	0,06
1	850052	+0,06	+0,06	0,04
1.001	850118	+0,05	+0,09	0,08
1.002	840738	+0,05	+0,05	0,06
1.003	840075	+0,03	+0,07	0,09
1.004	840578	-0,01	-0,06	0,05
1.005	840721	+0,10	+0,10	0,06
1.006	840083	+0,02	-0,06	0,08
1.007	840592	+0,04	+0,04	0,08
1.008	840683	+0,08	+0,09	0,08
1.009	840292	+0,05	+0,05	0,10
1,01	840721	0,00	-0,04	0,04
1,02	840880	+0,02	+0,02	0,04
1,03	840591	+0,08	+0,08	0,08
1,04	840705	+0,05	+0,05	0,07
1,05	840129	+0,09	+0,09	0,09
1,06	850006	+0,01	-0,05	0,06
1,07	850814	+0,02	-0,07	0,09
1,08	840235	0,00	-0,04	0,04
1,09	840000	+0,10	+0,10	0,08
1,1	840577	-0,03	-0,07	0,04
1,11	840532	+0,06	+0,06	0,05
1,12	840112	+0,03	+0,03	0,05
1,13	840958	+0,01	-0,05	0,06
1,14	840630	+0,08	+0,08	0,07
1,15	840342	-0,03	-0,09	0,06
1,16	840724	-0,01	-0,05	0,10
1,17	840854	+0,05	+0,05	0,08
1,18	840654	-0,06	-0,10	0,04
1,19	840289	+0,08	+0,08	0,06
1,2	840549	+0,05	+0,06	0,04
1,21	840069	0,00	-0,07	0,07
1,22	840360	-0,07	-0,07	0,10

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.2 – Certificado de *calibração* de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 2ª página



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Continuação do Certificado de Calibração Laboratório de Metrologia - Dimensional

2004-07-09

CERTIFICADO Nº LMD20045003619/30

Página 3 de 4

Comprimento Nominal (mm)	Nº Série	Desvio do Ponto Central (µm)	Máximo Desvio do V. Nominal (µm)	Variação dos Pontos Medidos (µm)
1,23	840562	+0,03	-0,06	0,09
1,24	850257	+0,09	+0,09	0,10
1,25	840658	+0,02	-0,04	0,07
1,26	840044	-0,03	-0,09	0,06
1,27	850114	+0,02	-0,05	0,07
1,28	850436	+0,11	+0,11	0,07
1,29	840682	+0,05	+0,12	0,10
1,3	840509	+0,06	+0,07	0,10
1,31	840799	+0,08	+0,10	0,10
1,32	840153	+0,05	+0,05	0,07
1,33	840651	+0,03	+0,03	0,06
1,34	850531	+0,04	+0,04	0,08
1,35	850131	-0,02	-0,05	0,03
1,36	850883	-0,06	-0,09	0,03
1,37	850666	+0,10	+0,10	0,06
1,38	840517	+0,04	+0,05	0,05
1,39	840012	+0,04	-0,06	0,10
1,4	840621	+0,11	+0,12	0,10
1,41	840140	+0,02	-0,06	0,10
1,42	850668	+0,01	-0,06	0,07
1,43	O20161	+0,03	+0,03	0,03
1,44	840172	+0,12	+0,12	0,05
1,45	850670	+0,08	+0,08	0,06
1,46	840079	+0,10	+0,10	0,07
1,47	840792	+0,03	-0,04	0,07
1,48	850831	+0,11	+0,12	0,06
1,49	840561	+0,09	+0,09	0,07
1,5	850089	+0,03	+0,07	0,10
2	850609	-0,01	-0,08	0,09
2,5	840340	+0,12	+0,12	0,10
3	840075	+0,01	+0,05	0,10
3,5	840505	+0,03	-0,07	0,10
4	840836	+0,05	+0,05	0,07
4,5	840760	+0,09	+0,09	0,10
5	850146	+0,07	+0,07	0,10
5,5	850573	-0,04	-0,12	0,08

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.3 – Certificado de *calibração* de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 3ª página



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Continuação do Certificado de Calibração Laboratório de Metrologia - Dimensional

2004-07-09

CERTIFICADO Nº LMD20045003619/30

Página 4 de 4

Comprimento Nominal (mm)	Nº Série	Desvio do Ponto Central (µm)	Máximo Desvio do V. Nominal (µm)	Variação dos Pontos Medidos (µm)
6	850046	+0,03	-0,07	0,10
6,5	840345	+0,04	+0,04	0,06
7	850228	+0,01	+0,03	0,04
7,5	800140	-0,03	-0,08	0,05
8	850284	+0,06	+0,07	0,05
8,5	850436	-0,04	-0,09	0,06
9	850325	0,00	-0,06	0,08
9,5	850242	-0,02	-0,04	0,02
10	----	----	----	----
20	025449	-0,07	-0,07	0,08
30	981074	+0,16	+0,20	0,05
40	840334	-0,08	-0,08	0,01
50	850234	-0,15	-0,18	0,05
60	850273	+0,17	+0,20	0,05
70	850358	-0,08	-0,09	0,05
80	840919	-0,11	-0,13	0,04
90	840931	-0,03	-0,09	0,07
100	850505	-0,29	-0,31	0,02

MEDICÃO DE PLANEZA

Todos os blocos estão dentro de tolerância da norma

INCERTEZA EXPANDIDA

$\pm (0,06 + 0,6 L) \mu\text{m}$, com L em m

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 EA-4/02.

CLASSIFICAÇÃO DOS BLOCOS PADRÃO DE ACORDO COM A ISO 3650

Valor Nominal (mm)		Desvios em µm					
		Grau 0		Grau 1		Grau 2	
De	Até	Desvio máximo do comprimento nominal em qualquer ponto	Tolerância de variação máxima em qualquer dos pontos medido	Desvio máximo do comprimento nominal em qualquer ponto	Tolerância de variação máxima em qualquer dos pontos medido	Desvio máximo do comprimento nominal em qualquer ponto	Tolerância de variação máxima em qualquer dos pontos medido
-	10	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
10	25	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
25	50	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
50	75	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
75	100	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.4 – Certificado de *calibração* de uma caixa de 87 blocos padrão LMD20045003619/30 - 4ª página



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Certificado de Calibração
Laboratório de Metrologia - Temperaturas

Pág. 1 de 2

DATA DE EMISSÃO: 2004/02/05

CERTIFICADO Nº LMT20045000270/10

CLIENTE:

CATIM - Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (LMD)
Rua dos plátanos, 197
4100 Porto

EQUIPAMENTO CALIBRADO:

Termo-Higrómetro
Marca

Marca VAISALA, modelo HMP 231 e nº de série V1230004.
Marca VAISALA, modelo HMD 40Y e nº de série Y4720011.

Resolução:

0,01 °C para os patamares de 1 a 5 e de 0,1 % para os patamares de 6 a 8.
0,1 °C para os patamares de 9 a 13 e de 0,1 % para os patamares de 14 a 16.

TRABALHO EFECTUADO:

Nas instalações do CATIM.

AMBIENTE:

Temperatura: (23±3) °C

Humidade: (50±10) %

DATA DE CALIBRAÇÃO: 2004-02-05

DESCRIÇÃO:

Calibração segundo os procedimentos internos:
LMT P03.09; LMT P03.37;

EQUIPAMENTO UTILIZADO:

SPRT 25 Ohm, nº refº 02.50585, calibrada no I.P.Q.; Sensor de Humidade THUNDER SCIENTIFIC; Estufa SAPRATIN nº refº 85/04087; Estufa THUNDER SCIENTIFIC, Refº 02.50587; Ponte Tinsley Consort, nº refº 93.40172/1, calibrada no I.E.P., rastreável ao I.N.E.T.I.,

"A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza padrão multiplicada por um 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 EA-4/02."

"O Instituto Português da Qualidade (IPQ) é um dos signatários do Acordo Multilateral EA para o reconhecimento mútuo de Certificados de Calibração"

O Técnico

(Aníbal José P. Pinheiro)

O Responsável Técnico

(Madalena Sarmento)



Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.5 – Certificado de *calibração* do *sistema de medição* de temperatura LMT20045000270/10 - 1ª página



Certificado de Calibração
Laboratório de Metrologia - Temperaturas

Pág. 2 de 2

DATA DE EMISSÃO: 2004/02/05

CERTIFICADO Nº LMT20045000270/10

Patamar	Leitura no Padrão	Leitura no Equipamento	Erro	Incerteza	
HMP 231					
1	19,0080 °C	18,99 °C	-0,02 °C	+/-	0,046 °C
2	19,6379 °C	19,63 °C	-0,01 °C	+/-	0,046 °C
3	20,2995 °C	20,28 °C	-0,02 °C	+/-	0,046 °C
4	20,5185 °C	20,50 °C	-0,02 °C	+/-	0,046 °C
5	21,0892 °C	21,07 °C	-0,02 °C	+/-	0,046 °C
6	35,02 %	35,9 %	0,9 %	+/-	1,0 %
7	45,09 %	45,3 %	0,2 %	+/-	1,0 %
8	55,02 %	54,8 %	-0,3 %	+/-	1,0 %
HMD 4DY					
9	19,0100 °C	18,5 °C	-0,5 °C	+/-	0,12 °C
10	19,6458 °C	19,0 °C	-0,7 °C	+/-	0,14 °C
11	20,2787 °C	19,6 °C	-0,7 °C	+/-	0,14 °C
12	20,5056 °C	20,0 °C	-0,6 °C	+/-	0,14 °C
13	21,0748 °C	20,6 °C	-0,5 °C	+/-	0,14 °C
14	34,99 %	31,8 %	-3,2 %	+/-	1,0 %
15	44,98 %	42,5 %	-2,5 %	+/-	1,0 %
16	55,01 %	51,6 %	-3,5 %	+/-	1,0 %

Os valores medidos na grandeza humidade são não acreditados.

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

Figura B.6 – Certificado de *calibração* do *sistema de medição* de temperatura LMT20045000270/10 - 2ª página

CERTIFICATE OF CALIBRATION

ISSUED BY **SELECT CALIBRATION LABORATORIES**

DATE OF ISSUE: 29 April 2003

SERIAL NO: 69188



No. 0105



SELECT WORKS

WILCOVE

TORPOINT

CORNWALL

PL11 2PT

TELEPHONE: (01752) 812147

TELEFAX: (01752) 814892

EMAIL: calibration@select-gauges.com

PAGE 1 OF 2 PAGES

APPROVED SIGNATORY

L. PAQUETTE

CUSTOMER : Brown and Sharpe Ltd.
Metrology House
Halesfield 13
Telford
TF7 4PL

FOR : Catim Centro De Apoio Tecnológico

DESCRIPTION : A set of 122 steel metric gauges

MANUFACTURER : Cary

ORDER NO. : 802986

SERIAL NO. : 0050478

BASIS OF TEST : BS EN ISO 3650 : Pt.1 1999

GRADE : K

FLATNESS AND PARALLELISM : The gauges in this set have been examined for flatness and parallelism of their measuring faces whilst wrung to a flat Tungsten Carbide platen on an Interferometer. The gauges were found to satisfy the accuracy requirements of the above specification.

MEASUREMENTS OF LENGTH : Length measurements have been made by Interferometry in terms of wavelengths of light emitted from Red and Green Laser light sources. Each gauge has been measured by wringing each of its measuring faces in turn to a flat Tungsten Carbide platen, the perpendicular distance from the platen to the centre of the exposed face was then determined. The mean deviation from nominal for these gauges is quoted on page 2, after due allowances have been made for optical phase changes which occur at the gauge/platen interface. Corrections have been applied for the effects of temperature, atmospheric pressure and atmospheric humidity on the wavelength of light and for the deviation of the gauge blocks from 20°C during the measurement cycle.

A co-efficient of linear expansion for Steel $(11.7 \pm 0.30) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ has been used in determination of length.

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT : ($\pm$)

Up to 10 mm	3	} x 10 ⁻⁵ mm
Above 10 up to 25 mm	4	
Sizes 30, 40, 50 mm	6	
60, 70, 75 mm	7	
80, 90, 100 mm	9	

NB. This is a certificate of Calibration not a certificate of conformity.

The uncertainties are for a confidence probability of not less than 95%. The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor of k=2, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

This certificate is issued in accordance with the requirements of the United Kingdom Accreditation Service as specified in the UKAS Accreditation Standard and UKAS Regulations. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

Figura B.7 – Certificado de *calibração* do conjunto dos blocos padrão de referência - 1ª página

CERTIFICATE OF CALIBRATION

SELECT CALIBRATION LABORATORIES

UKAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY NO. 0105



SERIAL NUMBER

69188

PAGE 2 OF 2 PAGES

DATE OF CALIBRATION : 28/04/2003

SERIAL NO : 0050478

SET TYPE : M122

SPECIFICATION : BS EN ISO 3650 : Pt.1 1999

GRADE : K

DEVIATION FROM NOMINAL IN UNITS OF 0.001 mm AT 20°C

SERIAL NUMBER	NOM. LENGTH	DEV.	SERIAL NUMBER	NOM. LENGTH	DEV.	SERIAL NUMBER	NOM. LENGTH	DEV.	SERIAL NUMBER	NOM. LENGTH	DEV.
1924792	0.5	0.00	1726559	1.21	+0.03	1126360	1.8	-0.05	1526142	17.0	+0.03
1526423	1.0	+0.02	2226534	1.22	-0.03	1625848	1.9	+0.02	825801	17.5	-0.03
2026566	1.0005	-0.08	925737	1.23	+0.06	826495	2.0	+0.02	1425808	18.0	+0.05
1626558	1.001	+0.02	426560	1.24	+0.01	726514	2.5	+0.03	726552	18.5	-0.02
125976	1.002	-0.01	1425866	1.25	+0.03	2225708	3.0	+0.07	1625806	19.0	0.00
2026539	1.003	+0.10	2325757	1.26	-0.04	2126346	3.5	0.00	1824217	19.5	+0.06
524711	1.004	+0.11	926527	1.27	+0.01	726512	4.0	+0.03	626531	20.0	-0.01
2126443	1.005	-0.11	1825833	1.28	+0.03	2326511	4.5	+0.05	823162	20.5	-0.03
125920	1.006	0.00	1626026	1.29	+0.01	2426335	5.0	+0.01	526554	21.0	+0.08
626567	1.007	+0.06	1926502	1.30	+0.05	2026483	5.5	0.00	1324460	21.5	-0.01
326544	1.008	-0.10	1826481	1.31	-0.01	180445	6.0	-0.03	826380	22.0	-0.03
1626518	1.009	+0.04	125984	1.32	0.00	10463	6.5	-0.02	124136	22.5	-0.01
426132	1.01	+0.06	325760	1.33	0.00	70377	7.0	+0.01	925912	23.0	-0.01
2224599	1.02	+0.02	425915	1.34	+0.04	210462	7.5	+0.04	1426489	23.5	+0.09
1326192	1.03	+0.06	826343	1.35	-0.07	170399	8.0	+0.04	1426553	24.0	-0.04
1426535	1.04	-0.01	825661	1.36	0.00	190460	8.5	+0.03	1021541	24.5	-0.06
2026389	1.05	+0.03	1526050	1.37	+0.04	240407	9.0	+0.09	1826166	25.0	0.00
1026032	1.06	+0.02	1625914	1.38	+0.02	140458	9.5	+0.01	426424	30.0	-0.05
326047	1.07	+0.07	626051	1.39	+0.02	180395	10.0	+0.02	426228	40.0	+0.10
2426373	1.08	-0.06	826474	1.40	+0.05	925799	10.5	-0.01	1426023	50.0	+0.01
1826374	1.09	+0.02	1325904	1.41	+0.07	426349	11.0	0.00	826434	60.0	+0.01
1726496	1.10	+0.03	825739	1.42	+0.02	1326145	11.5	+0.01	826529	70.0	-0.03
1726557	1.11	+0.03	424725	1.43	+0.01	1726015	12.0	+0.04	1325133	75.0	+0.01
2326568	1.12	+0.01	1625847	1.44	+0.02	625811	12.5	0.00	1226255	80.0	+0.18
1126569	1.13	+0.07	625849	1.45	+0.01	1425892	13.0	-0.02	1326520	90.0	-0.03
2025824	1.14	+0.06	2026333	1.46	+0.07	126382	13.5	+0.01	926519	100.0	-0.20
826538	1.15	+0.04	1424596	1.47	+0.01	626146	14.0	+0.10			
226571	1.16	0.00	925831	1.48	+0.03	226140	14.5	-0.02			
126570	1.17	+0.05	826338	1.49	+0.02	1126348	15.0	+0.04			
1726525	1.18	-0.02	826504	1.5	0.00	1626414	15.5	+0.02			
325763	1.19	+0.05	626472	1.6	-0.03	1526528	16.0	+0.05			
1626524	1.20	+0.03	526517	1.7	+0.04	626484	16.5	+0.02			

REMARKS : * Denotes out of tolerance for length

^ Denotes out of tolerance for uniformity.

The uncertainties are for a confidence probability of not less than 95%

Figura B.8 – Certificado de *calibração* do conjunto dos blocos padrão de referência - 2ª página

Anexo C

Contactos para futuros desenvolvimentos

Contactos para futuros desenvolvimentos.

LNE Paris

1,Rue Gaston Boissier

75724 Paris Cedex 15

Telefone: 01 40 43 37 00

Fax : 01 40 43 37 37

Endereço electrónico: <http://www.lne.fr>

Correio electrónico: info@lne.fr

Eric.fargier@lne.fr

Parker-Hannifin, Compumotor Division

Applications Engineer

Endereço electrónico: <http://www.compumotor.com>

Correio electrónico: ssohn@parker.com

help@parker.com

Parker-Hannifin Portugal, Lda

Travessa da Bateria, 184 – R/C D^{RTO}./1º ESQ.

4450-625 Leça da Palmeira

Telefone: 00 351 22 999 73 60

Fax: 00 351 22 999 15 27

Correio electrónico: fdias@parker.com

National Instruments Portugal

Av. Defensores de Chaves, 15-1ºD

1000-109 Lisboa

Telefone: 00 351 210 311 210

Fax: 00 351 210 311 220

Endereço electrónico: <http://www.ni.com>

Correio electrónico: ni.portugal@ni.com

