



**Jaime Alexandre Martins Machado**

**Automatização e Melhoria de uma  
Plataforma Móvel para o Suporte  
de um Cubo Retrorrefletor**

Dissertação para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica

**Orientador:** Professora Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas,  
FCT-UNL

**Coorientador:** Eng.<sup>a</sup> Liliana dos Anjos Félix Matos Eusébio,  
Departamento de Metrologia, Instituto Português da Qualidade

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

**Arguentes:** Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,  
Doutora Maria Isabel Araújo Godinho.

**Vogal:** Professora Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas.



Automatização e Melhoria de uma Plataforma Móvel para o Suporte de um Cubo Retrorrefletor

Copyright, 2014, Jaime Alexandre Martins Machado, FCT-UNL

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



## **Agradecimentos**

O presente trabalho não seria possível sem o apoio incondicional dos meus Pais, Luca e Carlos. Não existem palavras ou conceitos que exprimam o apoio, carinho e amor demonstrados, não só ao longo do meu percurso académico, como também ao longo de toda a minha vida, a eles ficarei eternamente grato. Gostaria de expressar, também, o meu agradecimento à minha família toda, pelo apoio e motivação transmitida.

Quero expressar uma palavra de agradecimento profundo à minha orientadora, Professora Doutora Helena Navas, da FCT, por me ter proporcionado esta oportunidade de estágio, e, também, pela imensa disponibilidade e orientação durante o decurso deste trabalho.

Agradeço à minha coorientadora, Eng.<sup>a</sup> Liliana Eusébio, do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade, pelo seu apoio, dedicação e motivação transmitidas durante a realização desta dissertação.

Quero agradecer ao Eng.<sup>o</sup> Carlos Pires, do Instituto Português da Qualidade, por se ter disponibilizado, em inúmeras ocasiões, para ajudar no projeto, mais precisamente na componente de programação que culminou na automatização do processo. Gostaria, também, de deixar uma palavra de agradecimento à Eng.<sup>a</sup> Sílvia Gentil pela partilha de conhecimentos.

Agradeço à Professora Carla Machado, do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da FCT, pelo tempo disponibilizado e partilha de conhecimentos. Agradeço, também, aos técnicos das oficinas do DEMI, Sr. Paulo e Sr. Campos.

Agradeço à Joana Santos, pelo apoio incondicional, paciência e carinho transmitidos nos momentos bons e menos bons que surgiram no decorrer desta dissertação.

Aos meus amigos, André, Fernando e Stéphane, deixo uma palavra agradecimento, sobretudo por todos os momentos passados ao longo do nosso percurso académico, e que sejam muitos mais fora dele.

Aos meus colegas, Adriana, Ana, Brás, Guedes, Guilherme e Tavares deixo uma palavra de agradecimento pelo apoio e motivação transmitidas ao longo do estágio no IPQ.

Por último, agradeço aos meus amigos e colegas com quem tive o prazer de conhecer ao longo destes anos inesquecíveis em Engenharia Mecânica na FCT.



## Resumo

Com a evolução da teoria e das práticas metrológicas das últimas décadas, levantam-se novas exigências e desafios relacionados com a atividade metrológica, nomeadamente no que diz respeito não só à exatidão e precisão, como também à repetibilidade, reprodutibilidade das medições e produtividade dos ensaios. Esta necessidade também foi sentida no Laboratório de Comprimento, LCO, do Departamento de Metrologia, DMET, do Instituto Português da Qualidade, IPQ, relativamente à calibração de instrumentos de medição.

Assim, surgiu entre outros, o projeto que visa o melhoramento do processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância. A presente dissertação e o estágio curricular no LCO foram desenvolvidos no âmbito deste projeto em colaboração entre o IPQ e a FCT-UNL.

O trabalho presente nesta dissertação centrou-se na necessidade de aumentar a produtividade do processo e a capacidade de resposta do laboratório, reduzindo o tempo necessário para a realização de cada calibração. Este objetivo foi alcançado através da automatização do processo, de modo a eliminar os desperdícios de tempo entre o deslocamento manual de uma plataforma e a aquisição dos valores associados à calibração.

No decurso do desenvolvimento deste trabalho, surgiram outras necessidades que precisavam, também, de resposta adequada. Assim, na presente dissertação também foi concebido, desenvolvido e implementado um dispositivo que auxilia a calibração, de modo a não ocorrer o desalinhamento inesperado dos feixes laser, entre outras ocorrências negativas.

Os objetivos do trabalho, tanto principais como secundários, foram alcançados. O dispositivo automatizado foi implementado e plenamente integrado nas atividades correntes do laboratório, permitindo uma poupança de 33.3% em termos de tempo de cada calibração efetuada, possibilitando com isso um aumento da produtividade e da capacidade de resposta do Laboratório de Comprimento.

**Palavras-chave:** Laser interferométrico, Interferometria, Calibração, Medição, Incerteza de medição, Metrologia.



## Abstract

With the evolution of the metrological theory and practices on the recent decades, new demands and challenges related to the metrological activity are raised, particularly regarding not only with accuracy, but as well with repeatability, reproducibility of measurements and productivity tests. This need was also felt in the “Laboratório de Comprimento”, “LCO”, of the “Departamento de Metrologia”, “DMET”, of the “Instituto Português da Qualidade”, “IPQ”, regarding the calibration of measuring instruments.

Thus emerged among others, the project that aims to improve the process of calibration in distance of interferometric laser. This dissertation and the traineeship at “LCO” were developed under this project in collaboration between the “IPQ” and the “FCT-UNL”.

The present work in this dissertation focused on the need to increase the productivity of the process and the responsiveness of the laboratory, reducing the time required to perform each calibration. This goal was achieved by automating the process so as to eliminate the waste of time between the manual displacement of a platform and the acquisition of values associated with the calibration.

During the development of this work, other needs, which also needed appropriate response, emerged. Thus, in the present work, a device, that assists the calibration, has also been conceived, developed and implemented, so that doesn't not occur unexpected misalignment of the laser beams, among other adverse events.

Both primary and secondary objectives have been achieved. The automated device was implemented and fully integrated within the normal activities of the laboratory, allowing a saving of 33.3% in terms of time of each calibration performed, thereby increasing the productivity and responsiveness of the “Laboratório de Comprimento”.

**Keywords:** Interferometric laser, Interferometry, Calibration, Measurement, Measurement Uncertainty, Metrology.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Objetivos da Dissertação.....	1
1.2	Estrutura da Dissertação .....	3
<b>2</b>	<b>Metrologia.....</b>	<b>5</b>
2.1	Definição de Metrologia .....	7
2.2	Categorias da Metrologia.....	7
2.3	Sistema Internacional de Unidades (S.I.) .....	9
2.4	Estrutura da Qualidade Nacional .....	11
2.5	Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM .....	15
2.6	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM .....	16
2.7	Princípios de Avaliação da Incerteza de Medição .....	16
2.7.1	Incerteza de Medição.....	17
2.7.2	Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada .....	18
2.7.3	Elementos Estatísticos de Avaliação da Incerteza-Padrão .....	21
2.7.4	Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída .....	23
2.7.5	Incerteza Expandida de Medição.....	24
2.7.6	Resultado da Incerteza de Medição Expandida.....	25
<b>3</b>	<b>Interferometria Laser .....</b>	<b>27</b>
3.1	Laser.....	27
3.2	Interferómetro de Michelson.....	29
3.3	Sistema Laser Interferométrico.....	30
<b>4</b>	<b>Pormenores Construtivos do Dispositivo.....</b>	<b>33</b>
4.1	Análise Crítica da Plataforma Inicial.....	33
4.2	Requisitos do Projeto .....	36
4.3	Dispositivo Desenvolvido.....	38
4.3.1	Fixação e Translação do Dispositivo.....	39
4.3.2	Rolamentos.....	46
4.3.3	Molas .....	47
4.3.3.1	Molas de Tração.....	47
4.3.3.2	Mola de Torção.....	51
4.3.4	Acionamento Automatizado.....	55
4.3.5	Produção e Montagem.....	59
<b>5</b>	<b>Procedimento de Calibração .....</b>	<b>61</b>
5.1	Descrição .....	61
5.2	Equipamentos Utilizados.....	62

5.2.1	Sistema Laser Interferométrico 5528A HP .....	62
5.2.2	Sistema Laser Interferométrico Splindler & Hoyer.....	66
5.2.3	Banco de Ensaio, SIP.....	67
5.2.4	Barómetro, Druck DPI 141.....	67
5.2.5	Termohigrómetro, Fluke 1620A.....	68
5.2.6	Computadores.....	68
5.2.7	Plataforma Regulável, Newport 37-M .....	69
5.2.8	Dispositivo de Translação .....	69
5.3	Descrição do Modo Operatório .....	69
5.3.1	Montagem Esquemática e Funcionamento.....	69
5.3.2	Procedimento de Início de Montagem.....	70
5.3.3	Condições Ambientais.....	72
5.3.4	Modos de Funcionamento do Interferómetro .....	72
5.4	Aceitação ou Rejeição de um Valor de Aquisição .....	73
<b>6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>75</b>
6.1	Avaliação de Incertezas de Medição do Processo de Calibração .....	75
6.1.1	Contribuição para a Incerteza-Padrão de Componentes com Dependência do Valor Nominal $L$ .....	75
6.1.1.1	Índice de Refração do Ar.....	75
6.1.1.2	Comprimento de Onda.....	76
6.1.1.3	Erro do Coseno.....	77
6.1.1.4	Conclusão.....	77
6.1.2	Contribuição para a Incerteza-Padrão de Componentes com Independência do Valor Nominal $L$ .....	78
6.1.2.1	Resolução do Laser Interferométrico HP .....	78
6.1.2.2	Tipo A para o HP.....	78
6.1.2.3	Erro Geométrico.....	78
6.1.2.4	Reprodutibilidade.....	78
6.1.2.5	Conclusão.....	78
6.1.3	Incerteza-Padrão .....	79
6.1.4	Incerteza Expandida de Medição.....	79
6.2	Ensaio Realizado .....	79
<b>7</b>	<b>Conclusões e Discussões de Resultados .....</b>	<b>83</b>
7.1	Conclusões .....	83
7.2	Sugestão para Melhoramentos Futuros .....	86
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>89</b>
	<b>Anexo A: Imagens do Dispositivo Desenvolvido.....</b>	<b>93</b>
	<b>Anexo B: Tabela de Aplicação Informática para Escolha de Molas.....</b>	<b>97</b>

<b>Anexo C: Dados de Aquisição .....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo D: Balanço de Incertezas de Medição .....</b>	<b>113</b>



## Índice de Figuras

Figura 1.1 – Instalações do Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), IPQ .....	2
Figura 2.1 – Padrão de platina iridiada referente à unidade metro.....	6
Figura 2.2 – Representação do Cúbito.....	6
Figura 2.3 – Relação entre as definições das sete unidades base do S.I. ....	11
Figura 2.4 – Hierarquia interna dos serviços do IPQ. ....	13
Figura 2.5 – Áreas de atividade do LNM.....	13
Figura 2.6 – Laboratório de comprimento .....	14
Figura 2.7 – Distribuição retangular .....	21
Figura 2.8 – Distribuição triangular .....	22
Figura 2.9 – Distribuição normal.....	23
Figura 3.1 – Estágios básicos de funcionamento de um laser .....	27
Figura 3.2 – Representação de um sistema laser completo, indicando os elementos responsáveis pela entrada, amplificação e saída de energia.....	28
Figura 3.3 – Esquema básico de um interferómetro de Michelson, onde $M_1$ e $M_2$ são os espelhos, D1 representa o divisor de feixe.....	29
Figura 3.4 – Representação tridimensional de um interferómetro de Michelson, apresentando uma lâmina de compensação. ....	30
Figura 3.5 – Esquema de um sistema laser interferométrico.....	31
Figura 4.1 – Imagem da plataforma móvel inicial no banco de ensaios SIP .....	34
Figura 4.2 – Desgaste dos elementos constituintes da plataforma inicial.....	34
Figura 4.3 – Orifícios e relevos que os elementos da plataforma móvel inicial apresentavam	35
Figura 4.4 – Tiras de fita-cola aplicadas na plataforma inicial .....	35
Figura 4.5 – Plataforma de inclinação e rotação modelo 37-M da Newport. ....	39
Figura 4.6 – Planos de contato.....	40
Figura 4.7 – Eixos representativos do sistema .....	41
Figura 4.8 – Escala de Invar associada ao banco SIP de 12 m .....	41
Figura 4.9 – Roda de borracha.....	42
Figura 4.10 – Representação dos pontos de apoio referentes aos rolamentos.....	43
Figura 4.11 – Representação pontos de apoio referentes aos rolamentos no plano horizontal superior.....	44
Figura 4.12 – Representação dos pontos de apoio inferiores ao banco SIP .....	44
Figura 4.13 – Fixação do dispositivo.....	45
Figura 4.14 – Rolamento 627-2z da SKF .....	47

Figura 4.15 – Localização da mola de tração .....	48
Figura 4.16 – Representação de uma mola helicoidal de arame com secção circular, projetada para esforços e tração .....	49
Figura 4.17 – Representação de uma mola helicoidal de arame com secção circular, projetada para esforços de torção. ....	52
Figura 4.18 – Ângulo aproximado da deformação da mola de torção durante o processo de calibração .....	53
Figura 4.19 – Pontos referentes ao sistema auto--ajustante .....	53
Figura 4.20 – Localização dos furos para fixação das hastes da mola torsional.....	53
Figura 4.21 – Motor da marca <i>Polulu</i> escolhido .....	55
Figura 4.22 – Placa de controlo de motores com potência elevada da <i>Polulu</i> e seus componentes.....	57
Figura 4.23 – Interface do programa fornecido pela <i>Polulu</i> .....	58
Figura 5.1 – Esquema de Rastreabilidade.....	62
Figura 5.2 – Fonte laser do sistema HP.....	63
Figura 5.3 – Unidade de controlo do sistema HP.....	64
Figura 5.4 – Componentes óticos .....	65
Figura 5.5 – Montagem dos pilares com a base e elemento fixação linear, suportando o cubo retrorrefletor .....	65
Figura 5.6 – Elementos de fixação.....	65
Figura 5.7 – Tripé e suas principais manivelas.....	66
Figura 5.8 – Banco de ensaios SIP de 12 m.....	67
Figura 5.9 – Barómetro Druck DPI 141.....	67
Figura 5.10 – Pormenor do mostrador do termohigrómetro Fluke .....	68
Figura 5.11 – Esquema da configuração de montagem do processo de calibração efetuado ...	70
Figura 5.12 – Fotografia da montagem de alguns elementos referentes ao processo de calibração .....	71
Figura 6.1 – Representação do erro do coseno.....	77
Figura 6.2 – Dispersão $d-D$ dos ensaios manuais efetuados.....	81
Figura 6.3 – Dispersão dos ensaios automáticos efetuados .....	82
Figura 6.4 – Dispersão de Erro Normalizado .....	82
Figura 7.1 - Atuador <i>Nano PZA12</i> e controlador <i>PZC200</i> da <i>Newport</i> .....	87
Figura 7.2 - <i>PZC-SB Switchbox</i> que permite o controlo de vários atuadores com um só controlador.....	87
Figura 7.3 – Diagrama das conexões para o controlo de vários atuadores com um controlador apenas através da <i>Switchbox</i> e com interface do computador.....	88

Figura A 1 – Banco de ensaios SIP e dispositivo.....	93
Figura A 2 – Vista explodida.....	94
Figura A 3 – Dispositivo desenvolvido em funcionamento .....	94
Figura A 4 – Cubo retrorrefletor alinhado com os feixes .....	95
Figura A 5 – Dispositivo de translação com componentes associados à translação automatizada .....	95



## Índice de Tabelas

Tabela 2-1 – Fatores de expansão $k$ para diferentes números de graus de liberdade efetivos $v_{ef}$ .....	25
Tabela 4-1 – Características dependentes do aço inoxidável 302.....	51
Tabela 4-2 – Especificações do motor escolhido.....	56
Tabela 4-3 – Características gerais da placa de controlo escolhida.....	58
Tabela 6-1 – Resultados finais na variante manual.....	80
Tabela 6-2 – Resultados finais na variante automatizada.....	81
Tabela B 1 – Características das molas de tração <i>standard</i> .....	97
Tabela B 2 - Características das molas de torção <i>standard</i> .....	97
Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual.....	99
Tabela C 2 – Resultados obtidos de um ensaio manual.....	105
Tabela C 3 – Valores médios obtidos de um ensaio manual.....	105
Tabela C 4 – Reprodutibilidade, HP.....	108
Tabela C 5 – Repetibilidade, Splindler.....	108
Tabela D 1 – Balanço de incertezas para o modo manual.....	113
Tabela D 2 – Resultados da incerteza-padrão combinada e incerteza de medição expandida .....	113
Tabela D 3 – Balanço de Incertezas para o modo automatizado.....	114
Tabela D 4 – Resultados da incerteza-padrão combinada e incerteza de medição expandida .....	114



## **Lista de Abreviaturas**

- BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*
- CAD – *Computer Assisted Design*
- CGPM – *Conférence Générale des Poids et Mesures*
- CIPM – *Comité International des Poids et Mesures*
- DEMI – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
- EURAMET – *European Association of National Metrology Institutes*
- FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia
- GPIB – *General Purpose Interface Bus*
- GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
- He-Ne – Hélio e Néon
- HP – *Hewlett & Packard*
- IPQ – Instituto Português da Qualidade
- ISO – *International Organization for Standardization*
- JCGM – *Joint Committee for Guides in Metrology*
- LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
- LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
- LCO – Laboratório de comprimento
- LNM – Laboratório Nacional de Metrologia
- OIML – *Internacional Organization of Legal Metrology*
- OQ – Observatório da Qualidade
- SFO – Sintetizador de Frequências Óticas
- SI – Sistema Internacional de Unidades
- SIP – *Société d'Instruments de Physique*
- SPQ – Sistema Português da Qualidade
- VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia
- VOL – Fator de Compensação



## Simbologia

$A$	Característica do material
$a$	Limite inferior
$a$	Valor da incerteza
$a_+$	Limite superior
$b$	Braço
$C$	Índice da mola
$c$	Velocidade de propagação da luz no vázio
$c_i$	Coefficiente de sensibilidade
$d$	Diâmetro
$D$	Valor do deslocamento do cubo retrorrefletor móvel
$D1$	Divisor de feixe
$De$	Diâmetro de enrolamento
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal
$F$	Força aplicada
$f$	Função modelo
$f_1$	Frequência do feixe laser 1
$f_2$	Frequência do feixe laser 2
$G$	Módulo de elasticidade torsional
$h_r$	Humidade relativa
$k$	Fator de expansão
$k_i$	Fator de concentração de tensões para efeito de enrolamento
$k_s$	Fator de concentração de tensões para efeito do esforço transversal
$L$	Valor nominal percorrido pelo cubo retrorrefletor
$Le$	Comprimento de enrolamento
$L_0$	Comprimento total da mola de tração
$L_0'$	Comprimento total da mola de torção

$L_c$	Lâmina de compensação
$L_h$	Comprimento da haste da mola de torção
$m$	Índice de refração do ar
$M$	Característica adimensional do material
$M_1$	Espelho móvel
$M_2$	Espelho fixo
$N$	Número de espiras ativas na mola
$n$	Número de observações repetidas
$P$	Ponto de observação
$p$	Pressão
$\bar{q}$	Média aritmética das observações
$q_j$	Observações
$S$	Diferença entre os dois feixes que incidem na unidade laser
$s(q)$	Desvio-padrão experimental
$s^2(q)$	Variância experimental
$T$	Momento de rotação
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$U$	Incerteza expandida de medição
$u(x_i)$	Incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada
$u_i$	Incerteza-padrão associada ao índice $i$
$u_i(y)$	Componente $i$ da incerteza associada à mensuranda $y$
$U_{pot}$	Energia potencial elástica da mola
$v$	Velocidade de propagação do feixe laser
$v_{ef}$	Número de graus de liberdade efetivos
$V_R$	Valor da verdadeira grandeza
$V_u$	Valor medido

$x_i$	Componente da estimativa da grandeza de entrada associada ao índice $i$
$X_i$	Grandeza de entrada
$y$	Estimativa da grandeza de saída
$Y$	Grandeza de saída
$\delta_{ADM}$	Tensão de corte admissível
$\delta_i$	Incerteza-padrão associada ao certificado de calibração do equipamento $i$
$\Delta f$	Variação de frequência
$\Delta x$	Deformação longitudinal
$\varepsilon$	Erro
$\theta$	Deformação angular
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu$	Média aritmética
$\sigma$	Desvio padrão
$\sigma_{ADM}$	Tensão normal admissível
$\sigma_{ROT}$	Tensão normal de rotura.



# 1 Introdução

Este capítulo realiza o enquadramento do presente trabalho, descrevendo os seus objetivos principais e as etapas que foram efetuadas no decurso do seu desenvolvimento.

## 1.1 Enquadramento e Objetivos da Dissertação

O trabalho elaborado na presente dissertação foi efetuado no âmbito do estágio realizado no Instituto Português da Qualidade, IPQ, mais concretamente no Laboratório de Comprimento, LCO. Trata-se de um laboratório que está integrado nas instalações do Laboratório Nacional de Metrologia, LNM, e é responsável pelo desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais de comprimento e ângulo plano. Está incumbido, também, da realização prática da definição do metro e radiano, calibrações relacionadas com os mesmos, participação e coordenação de comparações interlaboratoriais e, por último, oferece um apoio fundamental à metrologia legal [1].

A implementação, em 2006, do processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância até a 10 m, no LCO, permitiu que este se dotasse de capacidade para realizar a calibração global destes sistemas, o que até à data só era possível efetuar a calibração em distância até a 3 m ou na vertente de comprimento de onda [2].

A presente Dissertação teve origem no interesse, por parte dos elementos responsáveis deste laboratório, em melhorar este processo de calibração na variante de distância até a 10 m, com o intuito de aumentar a capacidade de resposta do laboratório, de modo a corresponder à cadência de calibrações que tem vindo a ser constatada nos últimos tempos.

Após formações realizadas e a familiarização adquirida relacionada com a calibração em questão e seus equipamentos, iniciou-se o estudo dos objetivos que visaram o melhoramento do processo de calibração. Fundamentalmente, o trabalho teve como objetivo principal a concretização de uma poupança de tempo na realização de cada calibração, permitindo assim o aumento da capacidade de resposta do laboratório. Indo ao encontro deste objetivo, foi necessário que fossem suprimidos os desperdícios de tempo que são resultado do deslocamento manual de uma plataforma que auxilia diretamente o processo de calibração. A translação desta plataforma é efetuada por motivos relacionados com o processo de calibração em si, tema que será abordado com mais detalhe em capítulos seguintes deste trabalho.

A calibração em causa é de cariz dinâmico, apesar da aquisição de valores ser efetuada quando a plataforma deslocada está imóvel. Em todos os momentos durante a calibração, onde se constata a deslocação da plataforma móvel, é efetuada a aquisição, por parte de um *Software* informático, do sinal proveniente dos laser, tanto o a calibrar como o que serve de referência. Este

dinamismo elevou o patamar de desafio relacionado com o dispositivo que foi desenvolvido, pois foi necessário ter em conta que os laser interferométricos, tanto o de referência como o a calibrar, necessitam de adquirir o sinal em todos os momentos do ensaio, com a penalização do técnico ter que reiniciar a calibração se houver falha do mesmo. Ou seja, depois de ser efetuado o alinhamento entre os feixes é fundamental que o deslocamento da plataforma móvel, que suporta um cubo retrorefletor, seja concretizado com a menor vibração e oscilação possíveis, de modo a não provocar o desalinhamento dos feixes laser

Essencialmente, pretendeu-se idealizar um sistema de calibração mais autónomo que o já existente, a fim de obter uma calibração mais eficiente do ponto de vista de tempo e minimização de quaisquer perturbações decorrentes da influência do técnico.

Para dar resposta a esta necessidade de melhoria, foi realizado um estudo, desenvolvimento e conceção de um dispositivo capaz de melhorar o processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância até 10 m. Após a sua implementação, seguiu-se a realização de testes e estudos com o respetivo sistema melhorado, comparando-o com o sistema inicial. Por último, foi efetuada uma análise estatística relacionada com os estudos efetuados de forma a fornecer a determinação das respetivas incertezas relacionadas com a calibração, de forma a validar o sistema implementado através deste trabalho.



**Figura 1.1 – Instalações do Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), IPQ [3]**

De uma forma sucinta, são aqui apresentadas as etapas realizadas no decurso do desenvolvimento deste trabalho:

- a) Apresentação do Laboratório Nacional de Metrologia, LNM, no âmbito da Metrologia Científica, Industrial e Metrologia Legal (estrutura e áreas científicas);
- b) Integração nas atividades desenvolvidas no Laboratório de Comprimento;
- c) Análise de necessidades de melhoramento da calibração de sistemas interferométricos em distância até 10 m;
- d) Pesquisa e estudo da bibliografia dedicada;

- e) Estudo, conceção e desenvolvimento de um dispositivo automatizado de suporte ao cubo retrorefletor, associado à calibração de sistemas laser interferométricos em distância até 10m;
- f) Realização de ensaios de calibração com o sistema melhorado;
- g) Avaliação estatística associada aos estudos efetuados e determinação das respetivas incertezas associadas;
- h) Comparação das incertezas associadas às calibrações efetuadas com a plataforma móvel inicial e dispositivo desenvolvido, possibilitando a validação deste último.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em sete capítulos principais:

O capítulo 1, denominado de *Introdução*, dá a conhecer as necessidades encontradas, as etapas do trabalho que foi desenvolvido e seus objetivos inerentes.

O capítulo 2, designado de *Metrologia*, apresenta os fundamentos da Metrologia e dá a conhecer as estruturas referentes à qualidade nacional, tais como o Instituto Português da Qualidade, Sistema Português da Qualidade e o Laboratório de Comprimento. É realizada, também, uma abordagem ao Sistema Internacional de Unidades, dando ênfase à definição da unidade metro. Por último, descreve a teoria dos processos de avaliação e determinação de incertezas de medição em ensaios laboratoriais, baseando-se no documento *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, GUM [4].

O capítulo 3, chamado *Interferometria Laser*, contempla os fundamentos teóricos de um dispositivo laser e de interferometria (interferómetro de *Michelson*). Neste capítulo é, também, realizada uma descrição detalhada do funcionamento e princípios teóricos de um sistema laser interferométrico.

O capítulo 4, intitulado *Pormenores Construtivos do Dispositivo*, apresenta uma análise crítica à plataforma móvel inicial, contendo os requisitos do dispositivo desenvolvido com base na análise efetuada às necessidades do projeto. É também apresentada a conceptualização do dispositivo desenvolvido em função dos requisitos, descrevendo detalhadamente o raciocínio que levou à criação do mesmo.

O capítulo 5, nomeado *Procedimento de Calibração*, dá a conhecer todos os procedimentos e equipamentos necessários para a realização do processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância até 10 m. É feita, também, uma descrição do modo operativo e dadas a conhecer as condições de rejeição e aceitação de valores da mensuranda em avaliação

O capítulo 6, designado de *Resultados*, faz a descrição e a apresentação dos vários constituintes de incerteza do modelo de cálculo para o processo de calibração de lasers interferométricos em distância. São expostas todas as calibrações laboratoriais efetuadas que sustentaram as experiências de validação, de modo a viabilizar totalmente o dispositivo desenvolvido.

O capítulo 7, denominado de *Conclusões e Discussões de Resultados*, descreve os comentários referentes aos resultados obtidos através dos ensaios, é feita uma comparação final entre as duas plataformas móveis com o intuito de viabilizar totalmente o dispositivo desenvolvido. São referidas, também, sugestões para trabalhos futuros relacionados com o melhoria adicional do dispositivo desenvolvido.

## 2 Metrologia

*“Immersion in water makes the straight seem bent; but reason, thus confused by false appearance, is beautifully restored by measuring, numbering and weighing; these drive vague notions of greater or less or more or heavier right out of the minds of the surveyor, the computer, and the clerk of the scales. Surely it is the better part of the thought that relies on measurement and calculation.”* Plato – The Republic, 380 A.C. [5].

Neste excerto de um discurso de Sócrates, redigido por Platão na época da antiga Grécia, 380 A.C., tendo como tema principal a definição de justiça, já referia o ato de medição para desambiguar a percepção relacionada com características intrínsecas de um objeto, por parte do ser humano, que pode facilmente ser distorcida através de elementos externos a este. Fazendo referência ao caso concreto da imersão em água de um objeto provocando a confusão na percepção das características geométricas do mesmo.

Desde uma época muito prematura que o ser humano se viu quase que obrigado a reger-se por métodos ou conceitos que apresentem a capacidade de completar uma descrição detalhada ou complementar uma comparação sobre os mais diversos artefactos ou situações. Seja por necessidade de comunicação entre os intervenientes para o desenvolvimento de um projeto de dimensões consideráveis ou apenas numa conversa entre amigos sobre a descrição de um automóvel topo de gama recente, é quase que impossível não recorrer às definições de pesos e medidas. Estas carências simples, porém importantes, representaram a base de sustento à desmedida necessidade que se verificou ao longo dos tempos relacionada com a padronização dos pesos e medidas através da implementação de um sistema de unidades, seja ao nível regional, nacional ou internacional.

A realização de medições erradas ou imprecisas representam fontes de decisões erradas, que podem ter repercussões graves, custando dinheiro e até em algumas situações vidas. As origens de consequências do foro humano ou financeiro, resultantes de medições mal efetuadas podem, em algumas situações, ter impactos praticamente incalculáveis. Portanto, é extremamente importante que existam métodos que possam originar medições fiáveis e, acima de tudo, com um elevado grau de precisão, que possibilite a sua aceitação por parte das autoridades relevantes no assunto, internacionalmente. Essa é a razão que leva os Metrologistas da atualidade a estarem numa busca contínua relativa a desenvolvimentos de métodos e técnicas de medição, instrumentação e procedimentos, para dar resposta à crescente demanda por maior exatidão, confiança e rapidez de medições [5].

De notar que as definições de pesos e medidas apresentam uma importância elevada no quotidiano de qualquer indivíduo, mesmo que este não esteja ciente disso, o que na maior parte das situações é o que se constata. É com esta base de importância que levou o ser humano em geral a

colocar grande ênfase na definição de padrões base, para satisfazer a necessidade de padronização dos Pesos e Medidas. Um exemplo que apoia este facto foi a criação do Sistema Métrico Decimal, em Paris no ano de 1799, pelo depósito de dois padrões de platina, que representavam o metro e o quilograma, dando origem assim ao atual Sistema Internacional de unidades (sistema SI), tema que será abordado com mais detalhe em capítulos seguintes deste trabalho [6].

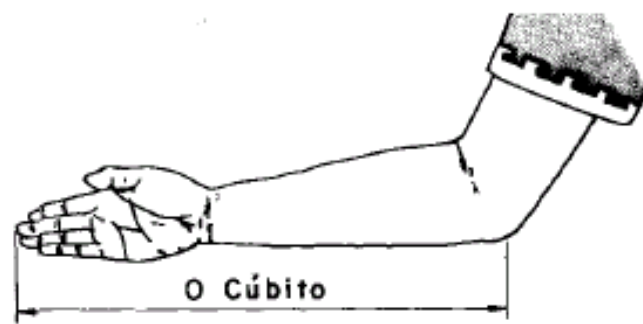
A figura seguinte ilustra o padrão de platina iridiada que representa a realização prática do metro de 1799.



**Figura 2.1 – Padrão de platina iridiada referente à unidade metro [5]**

Exemplo mais conturbado da história ocorreu há cerca de três mil anos A.C., no antigo Egipto, onde enfrentavam pena de morte todos aqueles que se esqueciam ou negligenciavam o dever de calibrar o padrão da unidade do comprimento da época, tendo a designação do cúbito real. Representa uma unidade definida pelo comprimento do braço medido do cotovelo à extremidade do dedo médio distendido. Trata-se de uma situação que retrata perfeitamente a frenética busca por parte da humanidade no encontro de padrões base reprodutíveis para o auxílio dos mais diversos tipos de medições [6].

A representação de como era definida a unidade de medida “o cúbito” é ilustrada na figura seguinte:



**Figura 2.2 – Representação do Cúbito [7]**

## 2.1 Definição de Metrologia

Tal como é expressado no Vocabulário Internacional da Metrologia, a Metrologia é a ciência da medição responsável pelas medições. Representa a sabedoria mais antiga do mundo onde o conhecimento de como é aplicada corresponde a uma necessidade fundamental em todas as profissões relacionadas com a ciência [6].

A Metrologia apresenta um papel fundamental no quotidiano de qualquer indivíduo, ainda que com uma presença bastante subtil e calma. É a ciência que abrange todos os aspetos teóricos e práticos relacionados com as medições, independentemente da incerteza, em qualquer campo da ciência e tecnologia. Esta engloba conhecimentos profundos que só são compreendidos na sua totalidade por muito poucos, porém a maioria a utiliza, com a confiança de que está a partilhar o conhecimento comum e sólido do significado de expressões como o metro, o litro, o segundo, o grau célsio, entre outros. É esta confiança que representa a âncora que permite a transmissão do poder para a Metrologia, dotando-a de capacidade de interligação das atividades ligadas ao dia-a-dia do ser humano, eliminando as fronteiras geográficas e profissionais [6].

A crescente cooperação em rede entre povos, relativa a unidades e procedimentos de medição comuns, tal como o reconhecimento, acreditação e ensaios de comparação de padrões de medições e de laboratórios em diferentes países, constituem a base sólida para que seja estabelecida a confiança relativa à partilha de conceitos de Pesos e Medidas que é proferida pelos cidadãos comuns no seu dia-a-dia, sem possuir a noção dos métodos e procedimentos complexos que permitem a definição destes conceitos de unidade fundamentais [6].

A Metrologia é uma ciência que contempla três tarefas principais [6]:

- a) A definição das unidades de medida internacionalmente aceites, por exemplo, o metro;
- b) A realização das unidades de medida, por métodos científicos, por exemplo, a realização do metro utilizando feixes laser;
- c) O estabelecimento de cadeias de rastreabilidade, documentando a exatidão de uma medição, por exemplo, a rastreabilidade entre o parafuso de micrómetro numa oficina de mecânica de precisão e de um laboratório primário de metrologia ótica do comprimento.

## 2.2 Categorias da Metrologia

A ciência da Metrologia é separada através de três categorias principais com níveis diferentes de complexidade e rigor. Cada uma destas é, naturalmente, responsável por objetivos principais diferentes, porém aquando da realização destes objetivos individuais, independentemente das categorias, estas contribuem, inevitavelmente, para o desenvolvimento e reconhecimento da Metrologia em geral.

As três categorias que dividem a Metrologia são as seguintes [6]:

- **Metrologia Científica**

Corresponde à categoria responsável pela organização e desenvolvimento das medições padrão e suas respectivas manutenções. De acordo com o BIPM, esta categoria de Metrologia está dividida em nove campos técnicos, porém, de acordo com a EURAMET existem três campos técnicos adicionais. Estas áreas técnicas estão relacionadas com os mais diversos campos, tais como: massa, eletricidade e magnetismo, comprimento ou tempo e frequência. Cada um destes campos apresenta subáreas inerentes aos mesmos. Pode-se verificar que, atualmente, não existe nenhuma definição formal que seja reconhecida internacionalmente sobre estes subcampos [6].

A metrologia científica constitui um elemento fulcral no crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e originando um ambiente propício ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país [8].

Existe ainda outra categoria inserida na ciência da Metrologia, designada Metrologia Fundamental, que é geralmente responsável pelo mais alto nível de exatidão alcançado dentro de cada campo técnico. Esta categoria não apresenta nenhuma definição internacional, porém pode ser designada como uma ramificação de topo referente à Metrologia Científica [6].

- **Metrologia Industrial ou Aplicada**

Tal como a Metrologia Científica, a Metrologia Industrial é uma categoria fundamental no crescimento e inovação tecnológica. É responsável pelo funcionamento adequado dos vários tipos de instrumentos de medição usados na indústria, tanto em ambiente de produção como em processos de teste, ou seja, está diretamente relacionada com as medições em processos de fabrico e de controlo de qualidade dos mais diversos produtos e serviços. Fundamentalmente trata-se de uma categoria que está diretamente ligada ao assegurar da qualidade de vida do cidadão comum e qualidade de trabalhos académicos [6][8].

Esta categoria tem, também, como base uma cadeia hierarquizada de padrões existentes em laboratórios e empresas, padrões estes rastreáveis a padrões primários, sejam nacionais ou internacionais [9].

- **Metrologia Legal**

A Metrologia Legal é a categoria da Metrologia que está relacionada com as atividades resultantes de exigências obrigatórias, relativas a medições, unidades de medida, instrumentos e métodos de medição, sendo estas exigências desenvolvidas por organismos acreditados para tal [10].

A sua origem surge da necessidade de garantir que ocorra uma troca justa, especificamente nas áreas relacionadas com os pesos e medidas. A garantia de que os instrumentos de medição estão de acordo com os limites legais, permitindo assim, medições corretas usadas em transações oficiais e comerciais, é um dos seus principais objetivos. A Saúde, indústria automóvel, controlo do ambiente e poluição, representam algumas das áreas relacionadas com outras áreas da legislação, fora do âmbito da Metrologia legal, onde as medidas são requeridas para garantir a conformidade com regulamentos ou legislações. Sempre com a supervisão do Governo, o controlo metrológico estabelece uma adequada transparência e confiança com base em ensaios imparciais [6][10].

A *International Organization of Legal Metrology*, OIML, é a organização internacional responsável pela harmonização dos procedimentos referentes à Metrologia Legal a nível mundial. Constitui uma organização de tratado intergovernamental fundada em 1955 com base numa convenção mundial. Tem como principal objetivo providenciar os seus membros (países) diretrizes a nível metrológico para a elaboração de requisitos nacionais ou regionais relativos à fabricação e uso de instrumentos de medição para aplicações de Metrologia Legal [6].

### **2.3 Sistema Internacional de Unidades (S.I.)**

O valor referente a uma grandeza é usualmente expresso através do produto entre um número e uma unidade. Esta última é simplesmente um exemplo particular da grandeza em questão, usada como referência. Por outro lado, o número expresso representa o rácio entre o valor da grandeza considerada e a unidade. Para exprimir uma grandeza específica, é possível utilizar inúmeras unidades diferentes. Um exemplo pode ser ilustrado com o caso em que se pretende quantificar a velocidade a que um automóvel se desloca, onde esta grandeza pode ser revelada sobre forma de  $v = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$ . Ou seja, o metro por segundo e o quilómetro por hora constituem unidades alternativas para manifestar o mesmo valor da grandeza velocidade [11].

A fim de ser estabelecido um sistema de unidades, tal como o Sistema Internacional de unidades, S.I., em primeiro lugar foi necessário estabelecer um sistema de grandezas e uma série de equações que possibilitem a definição de relações entre as grandezas envolvidas. Isto revelou-se uma necessidade pois, essencialmente, as tais equações entre as grandezas dão origem às equações que relacionam as unidades. De seguida, foi necessário, também, escolher definições para um número restrito de unidades, que são denominadas unidades de base e, em seguida, definir unidades para todas as outras grandezas como produtos de potências de unidades base, que são denominadas unidades derivadas. Naturalmente, as grandezas correspondentes são descritas como grandezas base e grandezas derivadas [11].

Sob o ponto de vista científico, a divisão das grandezas em categorias denominadas por grandezas de base e grandezas derivadas, trata-se de uma questão de convenção; isto não é

fundamental para a compreensão da física. Todavia, no que se refere às unidades, é importante que a definição de cada unidade de base seja efetuada com um cuidado particular, pois estas proporcionam o fundamento do sistema de unidades como um todo [11].

Relativamente ao Sistema Internacional de Unidades, as grandezas base consideradas são: comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa. Por convenção, estas grandezas base são consideradas como independentes. No entanto, as unidades de base correspondentes do SI, eleitas pela CGPM, *Conférence Générale des Poids et Mesures*, são: metro, quilograma, segundo, ampere, kelvin, mole e candela. Afirmando assim, que as unidades derivadas do S.I. são constituídas por produtos de potências das unidades base, segundo relações algébricas que definem as grandezas derivadas correspondentes, em função das grandezas base [11].

As definições oficiais de todas as unidades de base do SI foram aprovadas pela CGPM. As duas primeiras definições foram aprovadas em 1889, e a mais recente, em 1983. Estas definições são modificadas periodicamente a fim de acompanhar a evolução da ciência [11].

Os países estabelecem, por via legislativa, as regras concordantes à utilização das unidades tanto no plano nacional para uso geral como para campos específicos, como o comércio, a saúde, a segurança pública ou o ensino. Na maioria dos países a legislação baseia-se no emprego do Sistema Internacional de Unidades. A OIML é a instituição que cuida da harmonização internacional dessa legislação [11].

- **Unidade de Comprimento, o Metro**

Fundamentalmente é crucial fazer a distinção entre a definição de uma unidade e a realização prática dessa definição. Ou seja, a definição de cada unidade base do S.I. é redigida cuidadosamente, de maneira a que esta seja única e que, acima de tudo, forneça um fundamento teórico sólido que permita realizar medições mais exatas e reproduzíveis. Por outro lado, a realização da definição duma unidade é o procedimento segundo o qual a definição da unidade pode ser utilizada a fim de estabelecer o valor e a incerteza associada de uma grandeza do mesmo tipo de unidade [11].

Dito isto, a realização prática do metro, dada em 1889, era baseada no protótipo internacional de uma liga de platina e irídio (ainda conservado no BIPM nas mesmas condições que foram especificadas nessa época), substituída na 11ª CGPM, em 1960, por outra definição baseada no comprimento de onda de uma radiação do cripton 86. Através dos avanços na área da radiação laser, foi alcançada uma melhor estabilidade da radiação e melhor reprodutibilidade, permitindo assim que esta última definição fosse substituída, em 1983, na 17ª CGPM pela definição atualmente em vigor [11]:

“O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 do segundo.”

Contudo, é necessário reconhecer que mesmo sendo as sete grandezas de base consideradas, por convenção, independentes, as unidades base não o são. Daí, a definição do metro, como se pode verificar na Figura 2.3, incorpora o segundo; tal como a definição do ampère incorpora o metro, o quilograma e o segundo [11].

A figura seguinte ilustra como as definições de cada unidade base se relacionam entre si.

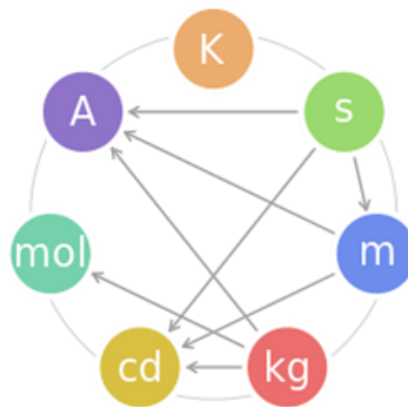


Figura 2.3 – Relação entre as definições das sete unidades base do S.I. Figura adaptada de [12]

## 2.4 Estrutura da Qualidade Nacional

- **Sistema Português da Qualidade**

Inicialmente o Sistema Português da Qualidade, SPQ, era denominado de Sistema Nacional de Gestão da Qualidade, SNGQ. Este sistema inicial foi instituído em 1983, através do Decreto-Lei n.º 165/83. A sucessão do SNGQ para o SPQ deu-se em 1993 através do Decreto-Lei n.º 234/93, a 2 de Julho [9].

Essencialmente o SPQ é um sistema que se assume com uma estrutura de âmbito nacional, que engloba, de forma integrada, entidades e organizações que têm como objetivo comum a dinamização da qualidade em Portugal. Estas entidades e organizações regem-se segundo princípios, regras e procedimentos aceites internacionalmente para estabelecer princípios e meios, bem como desenvolver ações que permitam de forma credível o alcance de padrões de qualidade adequados e a demonstração da sua obtenção efetiva, tendo em vista o universo das atividades, seus agentes e resultados nos vários setores da sociedade com o culminar da dinamização da qualidade em Portugal [13][14].

Este é um sistema que apresenta um funcionamento credível e transparente e que assegura a coordenação dos três subsistemas: a normalização, a qualificação e a metrologia, com vista ao desenvolvimento sustentado do País, e ao aumento da qualidade de vida da sociedade em geral. Assim, este sistema apresenta como objetivo a garantia de desenvolvimento da qualidade através de todas as entidades que, voluntariamente ou por inerência de funções, intervenham nos mais diversos sectores da sociedade [13][15].

Com o SPQ podem coexistir outros sistemas sectoriais ou entidades desde que demonstrem cumprir as exigências e regras estabelecidas, contribuindo assim para a igualdade de oportunidades e para o desenvolvimento sustentado da qualidade [14].

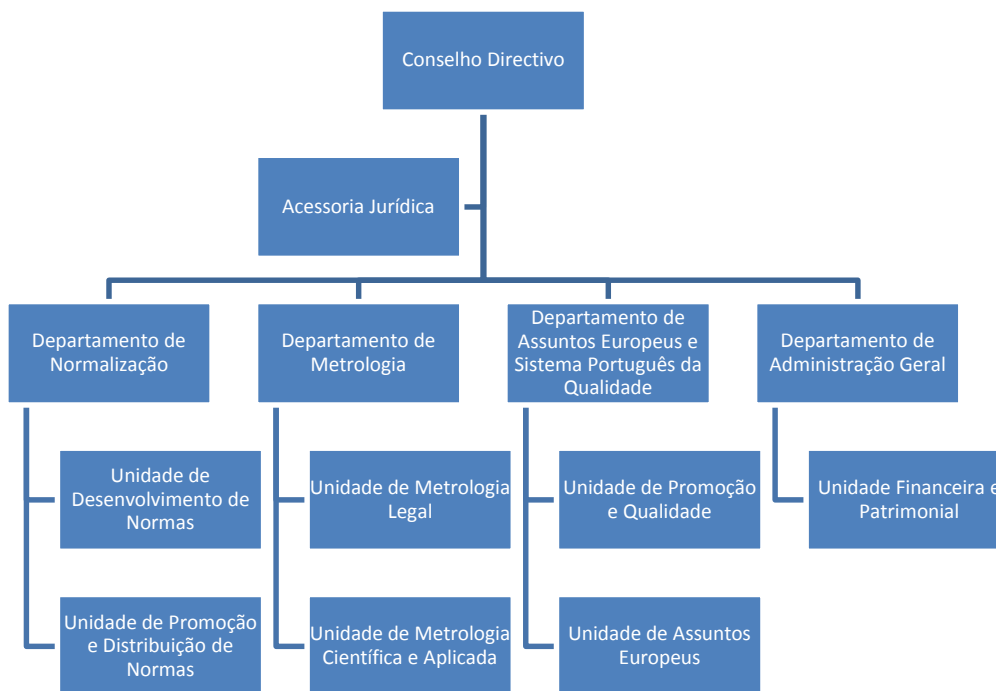
- **Instituto Português da Qualidade, IPQ**

O Instituto Português da Qualidade, IPQ, é o organismo gestor e coordenador do Sistema Português da Qualidade, SPQ.

Este instituto foi estabelecido em 1986, com sede em Caparica no concelho de Almada, através do Decreto-Lei n.º183/86 a 12 de Julho, permitindo assim que o Estado Português se dotasse de um organismo nacional responsável pelas atividades da Normalização, Certificação e Metrologia. Para além destas tarefas prestigiantes, o IPQ ficou responsável pela unidade de doutrina e ação do SNGQ, instituído pelo Decreto-Lei n.º 165/83, de 27 de Abril (SNGQ é a denominação inicial do SPQ). Essencialmente o IPQ foi criado com o objetivo de fornecer um término às preocupações crescentes a nível mundial relativamente à qualidade, quer como fator determinante para a produtividade e competitividade das atividades dos agentes económicos e do Estado, quer como elemento essencial para a qualidade de vida dos cidadãos [13].

O desenvolvimento de políticas, disponibilização de infraestruturas e metodologias que permitam a afirmação da competitividade do plano socioeconómico nacional, num contexto de globalização através dos subsistemas da Normalização, da Metrologia e da Qualificação, correspondem à global missão deste Instituto. Por outro lado, este organismo tem como visão afirmar o SPQ como suporte do desenvolvimento da Qualidade em todos os sectores de atividade em Portugal, contribuindo assim para o desenvolvimento da produtividade e da competitividade nacionais [14].

A organização interna dos serviços deste instituto é representada através do organograma da Figura 2.4.

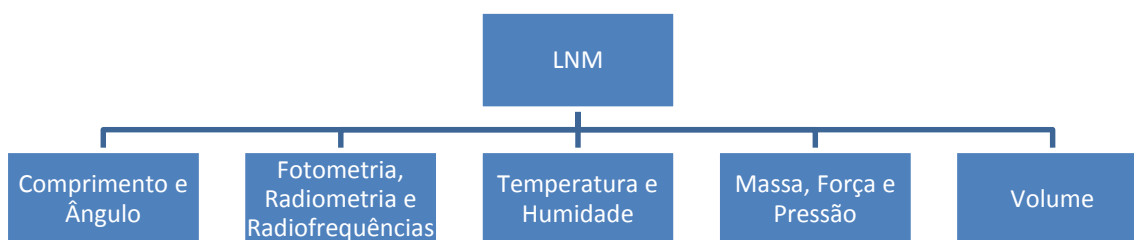


**Figura 2.4 – Hierarquia interna dos serviços do IPQ. Figura adaptada de [14]**

De acordo com os estatutos aprovados pela Portaria n.º23/2013 a 24 de Janeiro, a organização interna dos serviços do IPQ é constituída por quatro unidades orgânicas nucleares, permitindo ainda, através da deliberação do Conselho Directivo, que este organismo crie, modifique ou extinga até três unidades orgânicas flexíveis, integradas nos departamentos respetivos ou hierarquicamente subordinadas a este [14][16].

O Laboratório Nacional de Metrologia, LNM, faz parte do Departamento de Metrologia, DMET, é responsável pela realização dos padrões nacionais das unidades de medida, pela rastreabilidade dos padrões de referência existentes no país, pela realização de ensaios de Controlo Metroológico e apoio técnico à Metrologia Legal, pela realização de comparações internacionais e nacionais. Incluído no LNM está o LCO, onde foi realizado este trabalho.

Na Figura 2.5 está representado o organograma com alguns dos domínios de atividade do LNM [1].



**Figura 2.5 – Áreas de atividade do LNM. Figura adaptada de [1]**

- **Laboratório de Comprimento, LCO**

Trata-se do laboratório responsável, entre outras, pela realização prática da definição do metro. Realiza esta definição através de dois modos:

1. Através do comprimento de onda no vácuo de uma onda eletromagnética com uma frequência definida, onde este é obtido a partir da medição da frequência usando uma equação que inclui a constante da velocidade da luz. De notar que o sistema padrão usado no IPQ para o auxílio da realização prática da definição do metro é um Sintetizador de Frequências Óticas, SFO, constituído por dois laser (laser de Nb:YVO4 e laser femtossegundo KLM de Ti:Safira), um modelador ótico-acústico, uma fibra-ótica e um conjunto ótico e eletrónico;
2. Através de uma das radiações da lista publicada pelo BIPM, cujo valor do comprimento de onda ou da frequência pode ser utilizado com a devida incerteza explicitada e com as especificações e boas práticas de laboratório a ser seguidas. Este modo é auxiliado através de um laser de Hélio e Néon que se institui como um sistema padrão onde a sua rastreabilidade é obtida através da calibração com o SFO.

Este laboratório apresenta um leque com um total de catorze serviços de calibração disponíveis. Calibrações de laser com SFO, calibração de óticas angulares, calibrações de blocos padrão por interferometria absoluta, calibrações de esquadros óticos e calibrações de escalas métricas representam alguns dos serviços disponíveis. Contudo, o serviço associado ao dispositivo desenvolvido por este trabalho foi a calibração de sistemas laser interferométricos em distância até 10 m. Este laboratório realiza também o controlo metrológico, requerido por lei, de medidas materializadas de comprimento e sondas, através de verificações periódicas e extraordinárias.

A Figura 2.6 ilustra as instalações e alguns equipamentos referentes ao LCO.



**Figura 2.6 – Laboratório de comprimento**

## 2.5 Vocabulário Internacional de Metrologia, VIM

Qualquer ciência que se tenha de identificar com a habilidade de trocar ideias e resultados num plano nacional e/ou internacional assenta, necessariamente, num vocabulário que seja compreendido por todos os intervenientes. Na Metrologia, esse pormenor é bastante presente ainda que subtilmente, pois sem a compreensão relativa a conceitos básicos e/ou avançados de Pesos e Medidas entre entidades nacionais e/ou internacionais, a transmissão do conhecimento metrológico fica repentinamente comprometida. Pois, esta ciência é fundamentalmente dependente da compreensão entre as entidades que trocam ideias e fundamentos entre si através de um vocabulário que necessariamente tem de apresentar uma definição única para os intervenientes que o utilizam.

O VIM surge num contexto de uniformização da terminologia referente à Metrologia, na segunda metade do século XX, em resposta à eminente necessidade de harmonização internacional das terminologias e definições utilizadas nos campos da metrologia e da instrumentação. Consequentemente contribuíram, nessa época, para a tal dinamização e concordância de terminologias, três documentos normativos cuja ampla aceitação contribuiu para uma maior harmonização dos procedimentos e da expressão dos resultados no mundo da medição. O próprio VIM, o GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, de 1993) e o Guia ISO 25 de 1978, que mais tarde foi sucedido pela norma ISO/IEC 17025, correspondem a esses três documentos [17].

A formulação da primeira versão internacional do vocabulário VIM, em 1984, deu-se com o propósito de este representar uma referência comum para cientistas e engenheiros, bem como outros profissionais envolvidos no planeamento e realização de medições, independentemente do nível de incerteza de medição e do campo de aplicação em questão. Por outro lado, as organizações internacionais (BIPM, IEC, ISO e OIML) que participaram na conceção deste documento original pretenderam que este seja, também, uma referência para organismos governamentais e intergovernamentais, associações comerciais, organismos de acreditação, agências reguladoras e associações profissionais. Trata-se de um vocabulário que abrange os princípios básicos aplicáveis às grandezas e unidades, e revela-se bastante útil no tratamento de dados experimentais devido à sua abordagem da incerteza de medição, tema que também faz parte do GUM [4].

A 3.<sup>a</sup> edição do VIM, que anulou e substituiu a 2.<sup>a</sup> edição de 1993, é a edição mais recente. A versão em Português que foi utilizada como suporte a este trabalho corresponde à 3.<sup>a</sup> edição internacional do VIM (*International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms JCGM 200:2012*), edição bilingue em inglês e francês, publicada em 2012 pelo JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*), o comité para guias de metrologia do BIPM. Identificada como JCGM 200:2012, esta versão engloba o conteúdo da versão publicada em 2008 (JCGM 200:2008) e as alterações propostas em seu “Corrigendum” de maio de 2010 [17].

## 2.6 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM

Quando uma organização ou indivíduo relata um resultado de uma medição relativa a uma quantidade física é interessante que alguma informação quantitativa referente à qualidade do resultado obtido seja expressa de algum modo, possibilitando, posteriormente, a transmissão de um certo nível de confiança a outros que a venham utilizar. Sem este tipo de indicação, os resultados das medições efetuadas não podem ser comparados, seja entre si ou entre valores referentes a alguma especificação ou padrão. Portanto, é natural que tenha sido necessária a conceção de um procedimento comum e simplificado para a caracterização da qualidade dos resultados obtidos por medições, ou seja, possibilitando a avaliação e expressão da sua incerteza associada [4].

Foi através desta lacuna referente ao consenso internacional dizendo respeito à expressão de incertezas de medição que, em 1977, a autoridade mundial superior em Metrologia, o *Comité International des Poids et Mesures*, CIPM, solicitou ao BIPM, que resolvesse esta lacuna em cooperação com os laboratórios nacionais de Metrologia e que fizesse uma recomendação sobre este assunto. Consequentemente, o GUM foi preparado através de um grupo de trabalho formado por especialistas nomeados pelo BIPM, IEC, ISSO e OIML [4].

Fundamentalmente este guia estabelece regras gerais para a avaliação e expressão de incertezas de medição tendo como intuito a sua aplicação a uma ampla gama de medições. A Recommendation 1 (CI-1981) do CIPM e a Recommendation INC-1 (1980) do *Working Group of the Statement of Uncertainties* correspondem às bases deste guia [4].

No caso de se pretender uma avaliação pormenorizada da incerteza associada à calibração de instrumentos de medição é então adotado o documento “*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM*”, que estabelece princípios e requisitos gerais para a avaliação e expressão de incertezas de medição que são alusivas a vários níveis de exatidão e referentes a várias áreas [4].

## 2.7 Princípios de Avaliação da Incerteza de Medição

A mensuranda corresponde à grandeza que se pretende medir [17].

O objetivo de uma medição é determinar o respetivo valor da mensurada, que corresponde ao valor da grandeza particular submetida à operação de medição. Esta operação começa com a especificação apropriada da mensuranda, o método de medição e o procedimento de medição [4].

No geral, o resultado de uma medição é apenas uma aproximação ou estimativa do valor da mensuranda e, portanto, esta só pode estar completa quando acompanhada de alguma informação sobre a incerteza da sua estimativa [4].

O erro de medição,  $\varepsilon$ , é dado pela diferença entre o valor medido,  $V_M$ , e o valor que representa a dimensão da verdadeira grandeza,  $V_R$ . Esta diferença é representada pela Equação 2.1.

$$\varepsilon = V_M - V_R \quad \text{Equação 2.1}$$

Numa forma geral, são as imperfeições relativas à medição que dão origem a erros no resultado da mesma. Para o erro de medição total, contribuem dois tipos de erros [17]:

1. **Erro sistemático** – Trata de representar a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. Este tipo de erro não pode ser eliminado, no entanto, pode ser reduzido na maioria das situações. As suas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas, porém, pode-se aplicar um fator de correção para compensar o erro, quando é proveniente de causas conhecidas. Um valor de referência para este tipo de erro corresponde a um valor verdadeiro, ou um valor medido dum padrão com incerteza de medição desprezável.
2. **Erro aleatório** – Corresponde ao erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. Os erros aleatórios dum conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo zero, e pela sua variância. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensurada.

### 2.7.1 Incerteza de Medição

A incerteza de medição trata de corresponder a um parâmetro não negativo, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensurada, com base nas informações empregues [17].

Quanto maior for a incerteza de medição, menor será o grau de confiança que é associado ao valor correspondente à medição da mensurada [4].

Para se proceder a uma avaliação e estimativa da incerteza de uma medição é usado, geralmente, o procedimento descrito no GUM que descreve os seguintes passos [4]:

1. Expressar em termos matemáticos a dependência da mensurada  $Y$  em relação às grandezas de entrada  $x_i$ ;
2. Listar todos os componentes de incerteza;
3. Avaliar o tipo de incerteza (Tipo A ou Tipo B);
4. Calcular a incerteza-padrão para cada componente da incerteza;
5. Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
6. Avaliar a necessidade de cálculo das covariâncias;

7. Calcular a incerteza combinada;
8. Calcular o fator de expansão  $k$ ;
9. Determinar a incerteza expandida.

A especificação de uma mensuranda requer o conhecimento da natureza da grandeza e a descrição do estado do fenômeno, do corpo ou da substância da qual a grandeza é uma propriedade, incluindo qualquer constituinte relevante e as entidades químicas envolvidas [17].

Usualmente, no ato de calibração, lida-se com uma única mensuranda ou grandeza de saída,  $Y$ , que depende de um certo número de grandezas de entrada  $X_i$  onde  $i=1, 2, 3, \dots, N$ , que se regem pela relação dada pela Equação 2.2 [4].

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

**Equação 2.2**

A função  $f$  tem como objetivo a modelação do procedimento de medição bem como a modelação do método de avaliação. Esta descreve como é que os valores da grandeza de saída  $Y$  são obtidos a partir das grandezas de entrada  $X_i$ , podendo ser determinada experimentalmente, existir apenas como um algoritmo informático que necessita de ser avaliado numericamente, ou pode apresentar uma combinação de todas estas formas [18].

O conjunto correspondente às grandezas de entrada  $X_i$  podem ser agrupadas em categorias, de acordo com o modo como foram determinadas, o valor da grandeza e a incerteza associada. Dito isto, todas as grandezas de entrada apresentam um valor de incerteza associada. As incertezas que podem ser determinadas diretamente na medição, seja por uma simples observação ou observações repetidas, avaliações baseadas na experiência e correções relativas às indicações de instrumentos podem ser englobadas numa categoria. Por outro lado, as incertezas que decorrem de origens externas à medição, tais como grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, aos materiais de referência calibrados ou aos dados de referência adquiridos através de manuais, representam outra categoria distinta [18].

Relativamente à estimativa da mensuranda  $Y$ , a estimativa da grandeza de saída designada por  $y$ , é obtida a partir da Equação 2.2, usando as estimativas das grandezas de entrada  $x_i$  para os valores das grandezas de entrada  $X_i$  [18].

## **2.7.2 Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada**

Naturalmente, várias componentes contribuem para a incerteza de medição. Contudo, estas componentes podem ser avaliadas através de duas categorias distintas. Algumas podem ser estimadas através de uma avaliação de Tipo A da incerteza de medição, que tem como base uma distribuição

estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. Por outro lado, as componentes que não podem ser avaliadas através da categoria anterior podem ser estimadas por uma avaliação de Tipo B da incerteza de medição, podendo, também, ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações [17].

- **Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão**

A avaliação de Tipo A da incerteza padrão trata do método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações. A incerteza-padrão é o desvio-padrão experimental da média que decorre de um procedimento de cálculo da média ou de uma análise de regressão apropriada [18].

Este tipo de avaliação pode ser aplicada caso as várias observações independentes tenham sido efetuadas para uma das grandezas de entrada  $X_i$  nas mesmas condições de medição. Logo, considerando que a grandeza de entrada  $X_i$ , que é repetidamente medida, é representada pela grandeza  $Q$ , quando as  $n$  observações ( $n > 1$ ) são estatisticamente independentes, a melhor estimativa disponível do valor desta grandeza alcançada através da média aritmética das observações (Equação 2.3),  $\bar{q}$ . Considerando os valores individualmente observados,  $q_j$  ( $1, 2, \dots, n$ ), tem-se [4]:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 2.3}$$

A variância experimental dos valores  $q_j$ , dada pela Equação 2.4, trata de uma estimativa da variância da correspondente distribuição de probabilidade. O desvio-padrão experimental corresponde à raiz quadrada positiva desta variância. Porém, a melhor estimativa da variância da média  $\bar{q}$  é dada pela variância experimental da média dada pela Equação 2.5 [4].

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad \text{Equação 2.5}$$

A incerteza padrão  $u(\bar{q})$  da estimativa da grandeza de entrada  $\bar{q}$  é o desvio-padrão experimental da média, como se traduz na Equação 2.6 [4].

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 2.6}$$

- **Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão**

A avaliação de Tipo B da incerteza-padrão é o método de avaliação de incerteza que se rege por outros meios que não os da análise estatística de séries de observações, sendo que neste caso, a estimativa da incerteza-padrão é baseada noutro conhecimento científico [4].

Deve de ser reconhecido que a avaliação do Tipo B da incerteza padrão pode ser tão fiável comparativamente à avaliação do Tipo A, especialmente nas situações de medição onde a avaliação do Tipo A é baseada apenas num número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes [4].

A incerteza-padrão associada,  $u(x_i)$ , é avaliada por apreciação científica baseada em toda a informação disponível sobre a variabilidade possível de  $X_i$ , que pode ser proveniente dos seguintes elementos [4]:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações de fabricantes;
- Dados provenientes de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais.

No caso de apenas ser conhecido um único valor para a grandeza de entrada, seja por medição, valor resultante de uma medição anterior, um valor referência de literatura ou um valor de correção, esse é o valor que deve ser usado como o valor estimado de  $x_i$ . A incerteza-padrão  $u(x_i)$  quando dada deve ser adotada, senão deve ser calculada a partir de dados inequívocos ou avaliada com base na experiência [4].

Deve ser utilizado o correspondente valor esperado e a raiz quadrada da variância da distribuição, como estimativa da grandeza de entrada,  $x_i$ , se for possível atribuir uma distribuição de probabilidade para a grandeza  $X_i$ , baseada na teoria ou na experiência [4].

Para o caso de só ser possível estimar os valores dos limites  $a_+$  e  $a_-$ , limites inferior e superior, da grandeza  $X_i$ , deve ser usada uma distribuição de probabilidade retangular, descrita matematicamente pela Equação 2.7, para a variabilidade possível desta grandeza de entrada [4].

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ - a_-) \qquad \text{Equação 2.7}$$

Para os respetivos valores estimados o quadrado da incerteza-padrão fica [4]:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12} \cdot (a_+ - a_-)^2 \quad \text{Equação 2.8}$$

Se a diferença entre os dois limites for 2a, tem-se [4]:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3} \cdot a^2 \quad \text{Equação 2.9}$$

Para este tipo de avaliação da incerteza-padrão é utilizada uma distribuição retangular na situação de conhecimento insuficiente da grandeza de entrada  $X_i$ , na ausência de qualquer outra informação que não seja a dos seus limites de variabilidade. Porém, se inicialmente for conhecido que os valores centrais da grandeza apresentam uma maior probabilidade de ocorrência quando comparado com os valores limite, deverá ser usada uma distribuição triangular ou normal [18].

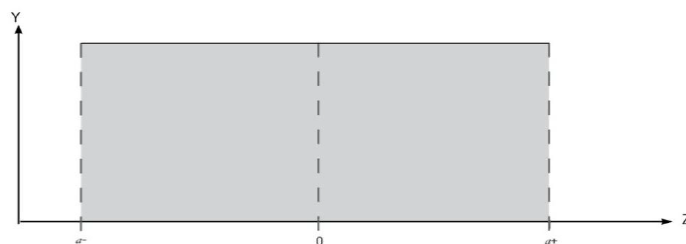
### 2.7.3 Elementos Estatísticos de Avaliação da Incerteza-Padrão

A incerteza-padrão,  $u(x_i)$ , e a estimativa da grandeza de entrada,  $x_i$ , são obtidas com base na distribuição de probabilidades dos valores da grandeza de entrada,  $X_i$ . A avaliação da distribuição da probabilidade desta grandeza é efetuada de acordo com dois tipos, avaliação do Tipo A e avaliação do Tipo B. A primeira trata de uma distribuição baseada na frequência dos valores de série de observações, a segunda trata de uma distribuição apoiada em informações previamente conhecidas sobre os valores da grandeza. Fundamentalmente, as distribuições de probabilidade são modelos que representam o estado do conhecimento das grandezas de entrada,  $X_i$  [4].

- **Distribuição Retangular**

Esta distribuição é geralmente utilizada na avaliação da incerteza de medição do tipo B, no caso de não existir nenhum conhecimento específico sobre os possíveis valores relacionados com a grandeza  $X_i$  dentro do intervalo considerado, Figura 2.7, e apenas se consegue estimar os valores do limite superior e inferior,  $a_+$  e  $a_-$ , desta mesma grandeza [4].

A figura seguinte ilustra uma distribuição retangular.



**Figura 2.7 – Distribuição retangular**

O valor esperado para a grandeza  $X_i$  está localizado no ponto médio do intervalo, como se pode verificar na Equação 2.10. Sendo que, a incerteza-padrão é obtida pela Equação 2.11 [4].

$$x_i = \frac{a_- + a_+}{2} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 2.11}$$

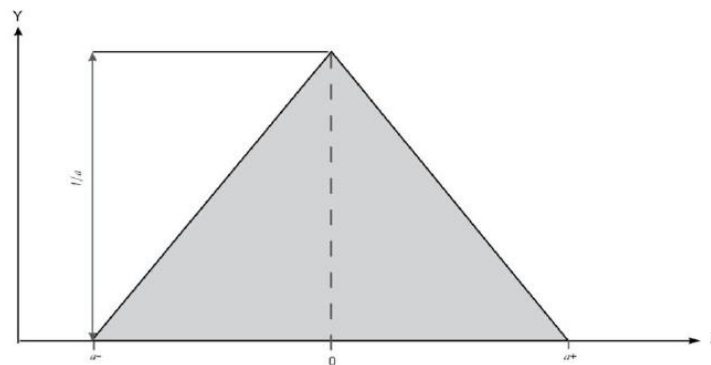
Se a diferença entre os dois valores limite,  $a_+ - a_-$ , for  $2a$ , ou seja, os valores são simétricos, então a Equação 2.11 transforma-se na Equação 2.12 [4].

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 2.12}$$

- **Distribuição Triangular**

No caso em que não existe conhecimento específico sobre os valores possíveis da grandeza  $X_i$ , ocorrem situações em que é mais realístico esperar que os valores desta grandeza ocorram próximos do ponto médio do intervalo estimado. Então é razoável que se use uma distribuição triangular, ilustrada na Figura 2.8. Trata-se de uma distribuição que ocorre geralmente numa avaliação da incerteza de medição do tipo B, e é uma distribuição de probabilidade contínua, de frequência decrescente em relação à média dos valores da grandeza de entrada,  $X_i$  [4].

A figura seguinte ilustra uma distribuição normal.



**Figura 2.8 – Distribuição triangular**

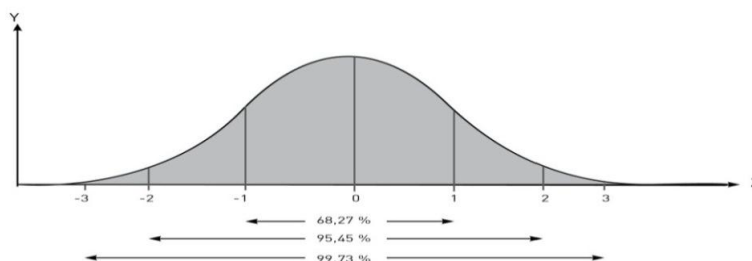
A incerteza padrão referente a esta distribuição é definida pela Equação 2.13 [4].

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{6}} \quad \text{Equação 2.13}$$

- **Distribuição Normal**

A distribuição normal, ilustrada na Figura 2.9, trata-se de uma distribuição de probabilidade contínua, que descreve as variáveis aleatórias independentes e frequência relativamente à magnitude dos valores de medição. É o tipo de distribuição geralmente usada na avaliação da incerteza de medição do Tipo A, porém existem casos de utilização da distribuição normal na avaliação do Tipo B, quando se conhece que os valores da grandeza de entrada  $X_i$  se apresentam mais centrais em relação ao limite [4].

A figura seguinte ilustra uma distribuição normal.



**Figura 2.9 – Distribuição normal**

Se a estimativa  $x_i$  for retirada de uma especificação de um fabricante, certificado de calibração ou de outras incertezas-padrão, e a sua incerteza citada é afirmada como sendo um particular múltiplo de um desvio-padrão, a incerteza-padrão  $u(x_i)$  é simplesmente o valor de incerteza citado,  $a$ , dividido pelo do fator de expansão,  $k$ , que se traduz na Equação 2.14 [4].

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad \text{Equação 2.14}$$

### **2.7.4 Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída**

O cálculo para a determinação da incerteza-padrão da mensuranda é realizado de acordo com o tipo de grandezas de entrada  $X_i$ , podendo as grandezas ser independentes entre si ou estar, de algum modo, correlacionadas [4].

Na situação em que se revela que as grandezas de entrada não estão correlacionadas entre si, ou seja, são independentes entre si, a incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída  $y$  é dada pela Equação 2.15 [4].

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 2.15}$$

Onde a grandeza  $u_i(y)$  corresponde à contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída  $Y$ , tendo a sua origem na incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ , como se pode analisar pela Equação 2.16 [4].

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \text{Equação 2.16}$$

Sendo que,  $c_i$  representa o coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ . Este descreve como a estimativa da grandeza de saída  $y$  é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada  $x_i$ . Este coeficiente é descrito matematicamente pela Equação 2.17 [4].

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 2.17}$$

Se as grandezas de entrada forem de algum modo correlacionadas, ou seja, se de uma ou outra maneira são mutuamente dependentes, a sua covariância tem de ser considerada como uma contribuição para a incerteza. A Lei de Propagação, dada pela Equação 2.18, aplica-se a estes casos [4].

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1/2 c_{ij}^2 + c_{ij}) u^2(x_i) u^2(x_j) \quad \text{Equação 2.18}$$

## 2.7.5 Incerteza Expandida de Medição

Foi decidido, através dos laboratórios acreditados pelos Organismos de Acreditação, que deve-se expressar uma incerteza de medição expandida  $U$ , através de uma multiplicação da incerteza-padrão,  $u(y)$ , da estimativa da grandeza de saída por um fator de expansão,  $k$ , descrita através da Equação 2.19 [4].

$$U = k \cdot u(y) \quad \text{Equação 2.19}$$

O fator de expansão,  $k$ , trata-se de uma estimativa correspondente a uma determinada probabilidade expandida. A estimativa deste fator requer que seja tida em conta a fiabilidade da incerteza-padrão  $u(y)$  da estimativa da grandeza de saída. Para a realização deste cálculo é necessário determinar o número de graus de liberdade efetivos,  $\nu_{ef}$ , da estimativa da grandeza de saída,  $y$ , dependentes da amostra utilizada [4].

O número de graus de liberdade efetivos é dado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite*, expressa pela Equação 2.20 [4].

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 2.20}$$

Em que  $u_i(y)$  representa as contribuições para a incerteza-padrão da estimativa de saída  $y$ , resultantes das incertezas-padrão das estimativas de entrada  $x_i$  [4].

Para uma dada incerteza-padrão dos valores de entrada obtida por uma avaliação do Tipo A, o número de graus de liberdade efetivos da componente da incerteza padrão  $u_i(y)$ , é dado pela Equação 2.21. No caso de a avaliação ser do Tipo B, é mais problemático estimar o número de graus de liberdade efetivos, sendo por norma mais prático fazer a avaliação de modo a garantir que não foi feita nenhuma subestimação. No caso do uso de uma distribuição retangular, o número de graus de liberdade da incerteza-padrão,  $u(x_i)$ , obtida por uma avaliação do Tipo B, pode ser tomada como  $v_i \rightarrow \infty$  [4].

$$v_i = n - 1 \quad \text{Equação 2.21}$$

Através da Tabela 2-1, que corresponde a uma probabilidade de 95,45% e que se baseia numa distribuição *t-student*, é possível obter-se a relação do fator de expansão  $k$ , com os graus de liberdade efetivos,  $v_{ef}$ . Quando existe um número de graus de liberdade efetivos elevados considera-se que esta distribuição aproxima-se de uma distribuição normal com o valor do fator de expansão,  $k=2$ . Se o valor obtido de  $v_{ef}$  não for inteiro, truncar este para o inteiro imediatamente inferior [4].

**Tabela 2-1 – Fatores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efetivos  $v_{ef}$ . Tabela adaptada de [4]**

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

### 2.7.6 Resultado da Incerteza de Medição Expandida

Na realização da calibração de equipamentos de medição, o resultado completo da medição consiste na estimativa  $y$  da mensurada e na incerteza expandida  $U$ , expresso pela Equação 2.22. Estes valores têm de estar expressos no certificado de calibração respetivo [4].

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 2.22}$$

De notar que este documento deverá, no caso geral, apresentar uma nota adicional com o seguinte conteúdo [18]:

*“A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k=XX$ , o qual para uma distribuição  $t$  com  $YY$  graus de liberdade efectivos*

*corresponde a uma probabilidade de 95% aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA-04/02”.*

### 3 Interferometria Laser

Este capítulo tem como objetivo dar a conhecer os conceitos relacionados com o funcionamento de um laser, princípios interferométricos (interferómetro de Michelson) e Sistemas Laser Interferométricos, de modo a fornecer a base para uma melhor compreensão do método de calibração que é tema deste trabalho.

#### 3.1 Laser

Julgando pelo seu impacto na economia, o seu papel na vida quotidiana e também pelo número de prémios Nobel atribuídos, os avanços na ciência e engenharia relacionados com lasers no quarto de século passado têm sido alucinantes. Através do uso de lasers, cientistas já recriaram o que se acredita ser a temperatura mais fria do universo e energias mais densas do que no centro das estrelas; puseram à prova as próprias fundações da teoria quântica; controlaram estados atômicos, moleculares e foto atômicos com uma precisão sem precedentes [19].

A palavra *laser* constitui um acrónimo para “*light amplification by stimulated emission of radiation*”. De um modo geral, um laser é um dispositivo que estimula os átomos ou moléculas que emitem luz em determinados comprimentos de onda amplificando-a, produzindo um feixe estreito de radiação que se traduz numa luz monocromática unidirecional e coerente, libertando grandes quantidades de energia através de radiação, com comprimentos de onda que variam entre 180 nm a 1 mm. Os adjetivos, unidirecional e coerente definem, neste caso, um feixe de luminoso que não diverge e que é emitido de forma ordenada, respetivamente [19][20].

- **Princípio Teórico de Funcionamento**

O funcionamento genérico de um laser pode ser compreendido com o auxílio da Figura 3.1, que ilustra as quatro etapas chave inerentes a este.

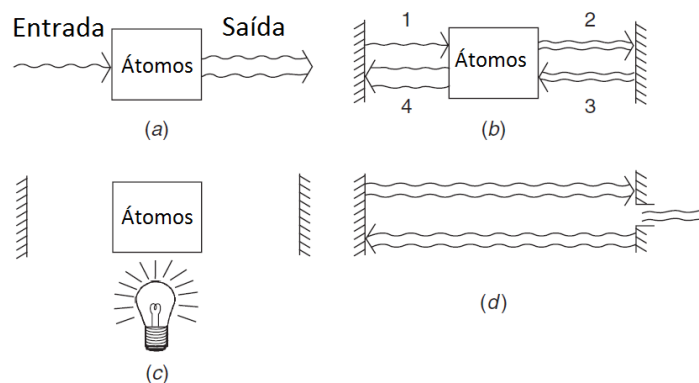
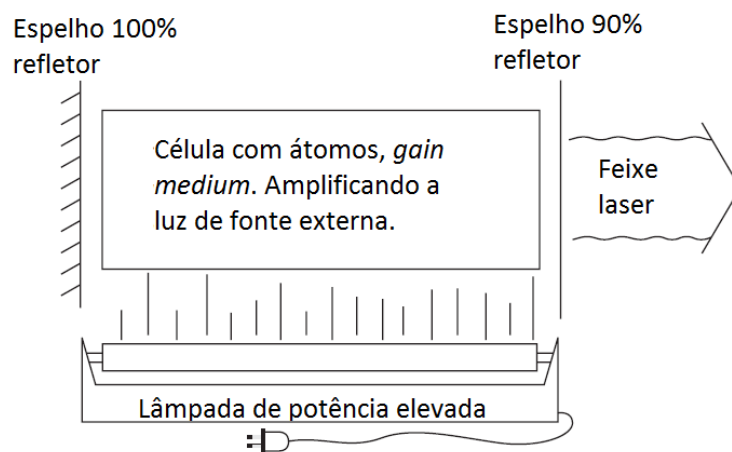


Figura 3.1 – Estágios básicos de funcionamento de um laser. Figura adaptada de [19]

Em primeiro lugar, um aglomerado de átomos amplifica um sinal de luz que os atravessa, como se pode verificar na Figura 3.1 (a). Numa escala individual, esta amplificação é notada quando um átomo se excita suficientemente para alcançar a sua última camada de valência, ou seja, o seu estado excitado, deixando uma lacuna na sua camada eletrónica, e ao retornar a essa lacuna (não necessariamente o mesmo eletrão) emite radiação eletromagnética, luz. O princípio físico responsável por esta amplificação de radiação é designado por emissão estimulada, onde os átomos ou moléculas são excitados na presença de outra onda luminosa com uma frequência bem determinada, levando à emissão de luz por parte do átomo ou molécula com a mesma frequência de onda luminosa presente neste processo. O material amplificador que é composto por estes átomos é confinado numa cavidade que retém a luz amplificada por este, redirecionando-a novamente para do centro, *gain medium*, originando amplificações repetidas, como é ilustrado na Figura 3.1 (b) [19][21].

Aquando da ocorrência deste processo de amplificação e perda de energia por parte do material amplificador, algum aprovisionamento desta tem de ser efetuado. Ou seja, é necessário que seja realizada a reposição da energia associada ao processo de amplificação que está a ser consumida no decurso da conversão, originando radiação eletromagnética. Como ilustra a Figura 3.1 (c), este abastecimento pode ser efetuado com o auxílio de uma fonte luminosa externa que, durante o processo de amplificação, encontra-se, constantemente, a fornecer energia ao material amplificador, *gain medium* [19][21].

A figura seguinte ilustra uma representação esquemática com os elementos base constituintes de um dispositivo laser.



**Figura 3.2 – Representação de um sistema laser completo, indicando os elementos responsáveis pela entrada, amplificação e saída de energia. Figura adaptada de [19]**

Como se pode verificar na Figura 3.2, dentro de um laser estão presentes dois espelhos, um que reflete na totalidade a radiação e outro que reflete 90% desta. Este último é o que possibilita o “escape” da radiação que origina o feixe do laser. Na realidade o espelho de saída está sempre a transmitir uma certa fração de radiação eletromagnética para o exterior, refletindo cerca de 90% da

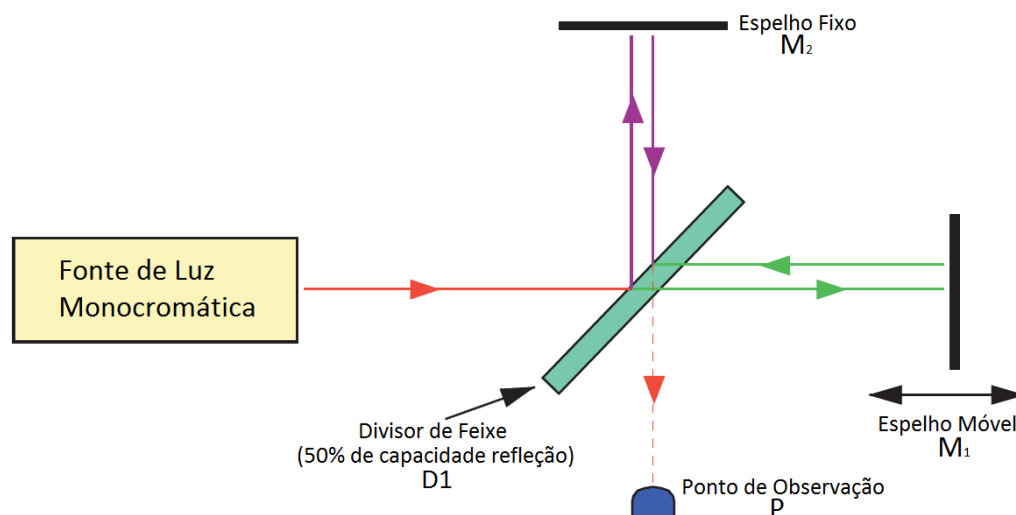
radiação para o interior. Isto é importante, pois permite que o dispositivo laser atinja um estado de equilíbrio, alcançando níveis de energia constantes, tanto interiormente como exteriormente [19][21].

### 3.2 Interferómetro de Michelson

Se dois feixes de luz se sobrepõem numa determinada região do espaço e nessa região a irradiância luminosa variar de ponto para ponto, entre máximos que se estendem à soma das irradiâncias de dois feixes e mínimos que podem ser zero, estamos perante um fenómeno denominado de interferência [22].

O interferómetro de Michelson, esquematizado na Figura 3.3, criado por Albert Abraham Michelson, é um interferómetro simples que se pode apresentar em diversas variantes, permitindo o estudo da interferência. Este corresponde ao tipo de interferómetros de divisão de amplitude que usam espelhos e divisores de feixe, pois, nestes interferómetros a onda primária dá origem a duas ondas com a mesma estrutura que se propagam ao longo de trajetórias distintas, que se forem sobrepostas, interferem. Apresenta a vantagem dos feixes sobrepostos estarem claramente separados antes da recombinação, pelo que um deles pode sujeitar-se, isoladamente, a alterações óticas controláveis [22].

A figura seguinte ilustra o posicionamento dos componentes base de um interferómetro de Michelson.

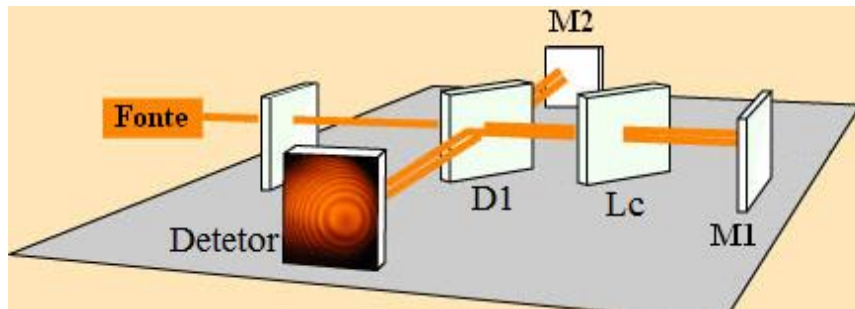


**Figura 3.3 – Esquema básico de um interferómetro de Michelson, onde  $M_1$  e  $M_2$  são os espelhos, D1 representa o divisor de feixe. Figura adaptada de [23]**

Como se pode verificar na Figura 3.3, a luz proveniente da fonte chega a um divisor de feixe D1 (espelho semitransparente) posicionado a 45° no sentido horário em relação à direção do feixe proveniente da fonte. Este feixe inicial é dividido em dois feixes, um deles percorre o caminho ótico

até ao encontro do espelho móvel  $M_1$ , o outro percorre o caminho ótico até ao espelho fixo  $M_2$ . De seguida, ambos os feixes são refletidos, através dos espelhos  $M_1$  e  $M_2$ , e retornam novamente ao divisor de feixe, D1. Estes dois feixes são recombinados e tomam o percurso ótico até ao ponto de observação P [22].

A figura seguinte fornece uma representação do posicionamento dos componentes de um interferómetro de Michelson onde é usada uma lâmina de compensação, possibilitando uma visualização das franjas obtidas no Detetor após a recombinação dos feixes.



**Figura 3.4 – Representação tridimensional de um interferómetro de Michelson, apresentando uma lâmina de compensação. Figura adaptada de [24]**

A fonte de luz pode ser pontual ou extensa, opção que condiciona o tipo de franjas que é possível observar através do Detetor, ilustrado na Figura 3.4. As distâncias entre o divisor de feixe e os dois espelhos devem ser idênticas. De notar que o não uso de uma fonte monocromática, e.g. laser, neste sistema interferométrico, obriga o uso de uma lâmina de compensação,  $L_c$  [22].

### 3.3 Sistema Laser Interferométrico

Os Sistemas Laser Interferométricos são amplamente usados em calibrações na área da Metrologia Dimensional. A rastreabilidade destes sistemas é conseguida através da calibração em frequência ou em comprimento de onda por comparação com os sistemas Laser Padrão. Sistemas estes que são constituídos por um Laser de Hélio-Néon estabilizado com célula de iodo, cujo valor do comprimento de onda ou da frequência pode ser utilizado com a incerteza explicitada no certificado de calibração correspondente. Entre outras aplicações, os Sistemas Laser Interferométricos são dos mais utilizados a nível nacional para a calibração de máquinas ferramentas [2].

Fundamentalmente, um laser interferométrico trata-se de um sistema de medição portátil que pode realizar o seguinte tipo de medições [25]:

- Distância;
- Velocidade;

- Deslocamento angular;
- Nivelamento;
- Linearidade;
- Perpendicularidade e paralelismo.

Para a realização de uma calibração completa destes sistemas é necessário efetuar a calibração em comprimento de onda, em distância e em ângulo. O dispositivo desenvolvido no âmbito deste trabalho contribui para a melhoria da calibração de sistemas laser interferométricos em distância. Não obstante, pode ser usado para outro tipo de calibrações desde que seja cumprido o propósito a que foi projetado, que se trata do movimento de translação linear automatizado de um elemento necessário à calibração.

### • Princípio Teórico de Funcionamento

O princípio teórico de medição de distâncias relativo a um laser interferométrico tem como base a teoria que fundamenta o interferómetro de Michelson, explicado no subcapítulo anterior.

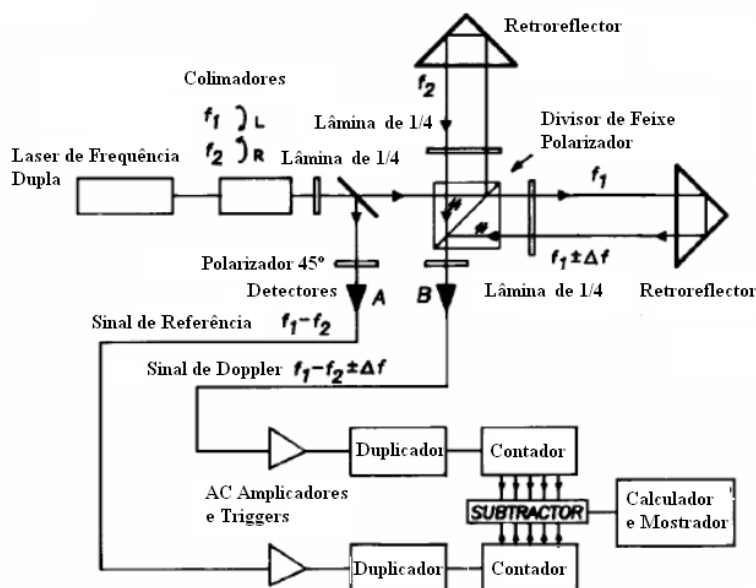


Figura 3.5 – Esquema de um sistema laser interferométrico. Figura adaptada de [2]

Fundamentalmente, como ilustra a Figura 3.5, num sistema laser interferométrico a unidade laser de Hélio-Néon que o constitui emite um feixe que sofre a ação de um campo magnético axial. Após a aplicação deste campo, o feixe inicial é dividido em dois com frequências  $f_1$  e  $f_2$  devido ao efeito de Zeeman<sup>1</sup>. Estes dois feixes criados apresentam polarização circular com direções opostas, onde a diferença de frequência entre eles é da ordem dos 2 MHz. Com o intuito de transformar as

<sup>1</sup> Consiste no deslocamento das linhas espectrais de um sistema (átomos, moléculas ou impurezas em cristais) em vários componentes através da ação de um campo magnético [26]

polarizações circulares das frequências  $f_1$  e  $f_2$  em polarizações lineares ortogonais entre si, uma no plano horizontal e outra no plano vertical, é introduzida no sistema uma lâmina de atraso de  $\lambda/4$ . Antes do feixe laser ser emitido pela unidade de controlo uma percentagem deste é desviado por um divisor de feixe e posteriormente detetado por um foto detetor (foto-detetor A), como é ilustrado na Figura 3.5. De seguida, é detetada a amplitude de modulação deste sinal desviado com frequência  $f_1 - f_2$  e é transmitida esta informação ao contador. Por outro lado, os dois feixes iniciais emitidos com polarizações lineares ortogonais,  $f_1$  e  $f_2$ , sofrem uma separação através de um divisor de feixe polarizador, que seguidamente são transformados em feixes com polarização circular aquando da sua nova passagem através de outra lâmina de atraso,  $\lambda/4$ . De seguida são refletidos nos cubos retrorrefletores e tomam o percurso ótico até atravessarem novamente as lâminas de atraso, convertendo-os novamente em feixes com polarizações lineares ortogonais. Estes feixes são de seguida recombinados no divisor de feixe e à saída deste, um polarizador a  $45^\circ$  coloca as componentes dos feixes sobre esse plano, onde o sinal recombinado é detetado pelo foto-detetor B e a amplitude de modulação com a frequência  $f_1 - f_2 - \Delta f$  é enviada para outro contador. O deslocamento do cubo retrorrefletor móvel induz o efeito de Doppler<sup>2</sup> que se traduz na variação de frequência  $\Delta f$  [2].

É então realizada a comparação entre os dois sinais, onde a frequência obtida é dada pela Equação 3.1 [2].

$$\Delta f = -2 \cdot f_2 \cdot n \cdot \frac{v}{c} = -2 \cdot \frac{v}{\lambda_2} \quad \text{Equação 3.1}$$

O rearranjo da Equação 3.1 traduz-se na Equação 3.2 [2].

$$v = -\frac{\lambda_2 \cdot \Delta f}{2} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde  $\lambda_2$  é comprimento de onda da frequência  $f_2$  e  $v$  corresponde à velocidade de propagação do feixe [2].

O valor do deslocamento,  $L$ , do cubo retrorrefletor móvel é dado pela integração da Equação 3.2 em função do tempo, como se pode verificar na Equação 3.3 [2].

$$L = \int_{t_0}^{t_1} v \cdot dt = -\frac{\lambda_2}{2} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \Delta f \cdot dt \quad \text{Equação 3.3}$$

---

<sup>2</sup> Trata-se de uma característica observada em ondas emitidas ou refletidas por fontes em movimento relativo ao observador [27]

## 4 Pormenores Construtivos do Dispositivo

Neste capítulo é feita uma análise crítica da plataforma que existia anteriormente, apontando os aspetos negativos e positivos inerentes à mesma.

Também contém os requisitos do dispositivo desenvolvido estabelecidos com base na análise efetuada às necessidades do projeto.

A seguir é apresentado o desenvolvimento do dispositivo e dos seus componentes, abordando os processos de fabricação dos mesmos. Também é feita uma descrição do *hardware* e *software* necessários à automatização do dispositivo, que têm como objetivo o controlo e a programação do movimento de translação.

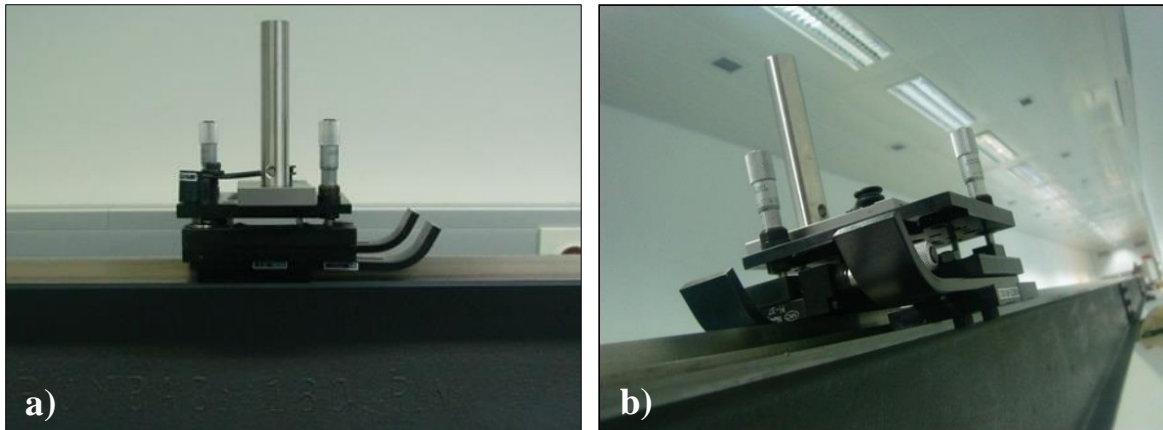
### 4.1 Análise Crítica da Plataforma Inicial

Inicialmente a calibração de sistemas laser interferométricos em distância era efetuada com o auxílio de uma plataforma móvel, construída com vários componentes e peças laboratoriais. Esta efetuava o suporte e translação do cubo retrorrefletor, elemento essencial da calibração em questão.

A translação desta plataforma era inicialmente efetuada manualmente através de uma força aplicada pelo técnico, onde esse deslocamento era auxiliado através da geometria que o banco de ensaios SIP oferece. Porém, a dificuldade na deslocação do carrinho no banco de ensaios fazia com que os feixes laser desalinhassem em algumas situações, obrigando o técnico a recomeçar de novo a calibração.

Por muito cuidado que o técnico tivesse, o deslocamento era realizado de forma inconstante, pois este era efetuado através do contacto direto entre o alumínio, que constituía as peças que formavam a plataforma móvel inicial, e o aço de que é constituído o banco de ensaios SIP de 12 m. Ainda que a zona do banco, onde assentavam os elementos da plataforma móvel, é constituída por aço maquinado, os coeficientes de atrito, tanto estático como dinâmico, revelavam ser de intensidades bastante consideráveis, tendo em conta que se trata de um processo de calibração onde as partes móveis têm de ser deslocadas com a maior suavidade e menor vibração possíveis.

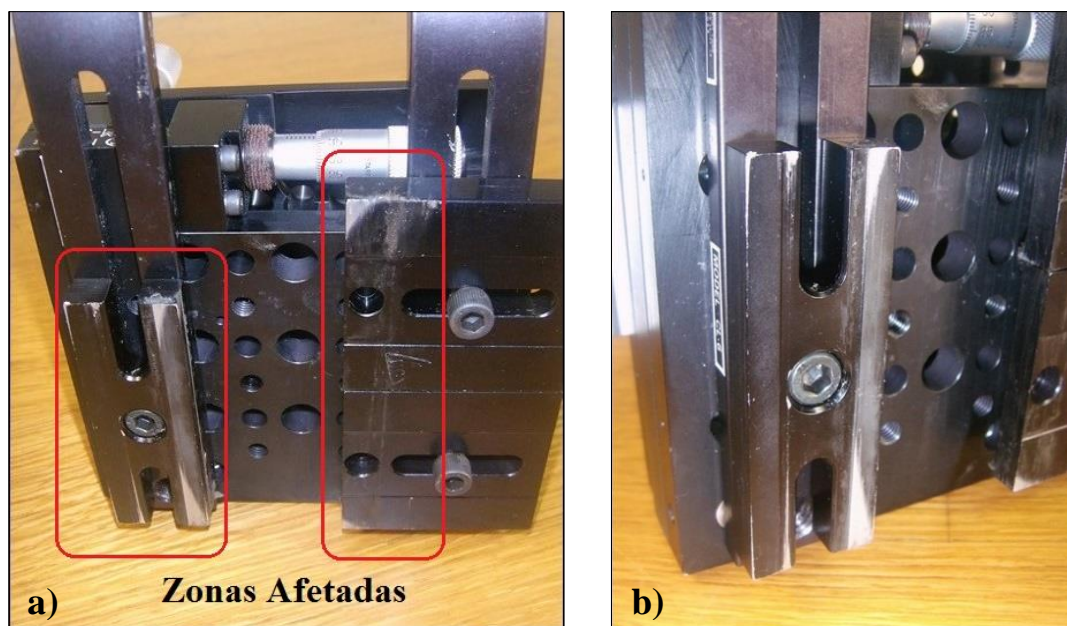
A figura seguinte ilustra a plataforma móvel que auxiliava inicialmente a translação do cubo retrorrefletor.



**Figura 4.1 – Imagem da plataforma móvel inicial no banco de ensaios SIP: a) vista global; b) pormenor**

Como o deslocamento desta plataforma inicial era efetuado através do contato direto entre os elementos constituintes deste e o aço do banco de ensaios SIP é natural que se tenha dado um desgaste progressivo da superfície dos elementos que realizavam o contato efetivo.

É possível verificar, na Figura 4.2, o desgaste que o atrito devido ao contacto entre estas duas superfícies provocou nos elementos constituintes da plataforma inicial.



**Figura 4.2 – Desgaste dos elementos constituintes da plataforma inicial: a) Total de zonas afetadas; b) Pormenor de zona afetada**

De modo a atenuar as forças de atrito envolvidas, os responsáveis e técnicos do laboratório aplicavam lubrificante na superfície maquinada do banco de ensaios. De facto isto reduzia a força que o operador teria de imprimir na plataforma para contrariar a força de atrito, tanto estática como dinâmica, induzindo assim o movimento desta. Todo este processo executado com o intuito de reduzir as forças de atrito envolvidas era complementado com a introdução de tiras de fita-cola, em dois elementos da plataforma. Estes elementos apresentavam orifícios e sulcos, como se pode

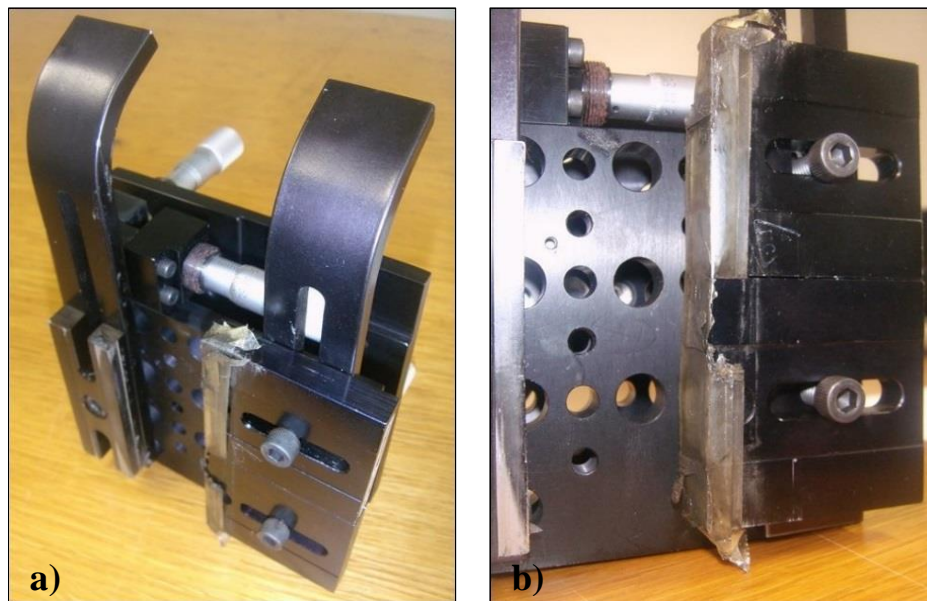
verificar na Figura 4.3, que, de certo modo, colhiam o óleo aplicado na superfície do banco de ensaios, riscando-a e desprovendo-a de lubrificante à medida que a calibração ia decorrendo.

A figura seguinte demonstra a superfície dotada de imperfeições que realizava o contato direto com o banco de ensaios SIP.



**Figura 4.3 – Orifícios e relevos que os elementos da plataforma móvel inicial apresentavam**

A figura seguinte ilustra a aplicação de tiras de fita-cola de modo a atenuar os efeitos da superfície inconstante dos elementos constituintes da plataforma inicial que realizavam o contato direto com a superfície do banco de ensaios SIP.



**Figura 4.4 – Tiras de fita-cola aplicadas na plataforma inicial: a) Perspetiva da plataforma; b) Pormenor de aplicação de tiras de fita-cola**

Todo o processo de introdução de produto lubrificante e seus subprocessos apresentavam aspetos negativos que se traduziam em desvantagens óbvias no uso desta plataforma. Os pontos negativos podem ser traduzidos da seguinte maneira:

- a) O gasto de verbas em aquisição de lubrificantes adicionais;
- b) Cada vez que se necessitava de calibrar um laser interferométrico, usando esta plataforma, o técnico teria que aplicar lubrificante no banco de ensaios SIP;
- c) Se alguma calibração excedesse um dia de trabalho, a camada de lubrificante anterior teria de ser renovada, pois a camada aplicada no dia anterior começava a apresentar indícios de secagem;
- d) O laboratório onde esta calibração é efetuada necessita de estar sempre limpo e isento de impurezas, estando deste modo com condições ambientais controladas, tais como temperatura e humidade. A aplicação de um fluido com alto índice de sujidade é pouco recomendado, ainda assim foi usado por necessidade;
- e) Sempre que fosse efetuada uma calibração desta categoria, era necessário dedicar um tempo considerável na limpeza do lubrificante aplicado na viga de 12 m. Pois, esta viga da marca SIP serve de auxílio a outro tipo de calibrações, e.g., calibrações de sondas de comprimento, logo não é viável que esteja contaminada com qualquer outro tipo de produto;
- f) O facto de o técnico ter que usar tiras de fita-cola numa plataforma.

Com o exposto foi necessário encontrar uma solução, onde o decréscimo dos coeficientes de atrito fosse obtido por outra forma mais eficaz, tema que será abordado em subcapítulos seguintes. De notar que apesar da plataforma inicial ter sido utilizada para a realização de calibrações efetuadas com sucesso, dados os objetivos referentes ao aumento da capacidade de resposta do laboratório em questão, esta pôde ser melhorada.

## **4.2 Requisitos do Projeto**

Existia um número significativo de necessidades que precisavam de ser satisfeitas para que a calibração em distância dos sistemas interferométricos fosse efetuada com um grau de eficácia superior. Estas necessidades de melhoria eram de uma categoria relacionada não só com os materiais e dispositivos utilizados na calibração mas também com problemas que o operador necessitava que fossem eliminados ou atenuados, tanto para redução de tempo como para redução de custos. Naturalmente que, quanto menor o tempo requerido para a calibração referida, mais depressa o operador estará disponível para outro tipo de funções.

O estudo, desenvolvimento e conceção do dispositivo que auxilia o processo de calibração foi efetuado tendo em conta as limitações encontradas, materiais existentes no mercado, especificações técnicas e custo total do projeto.

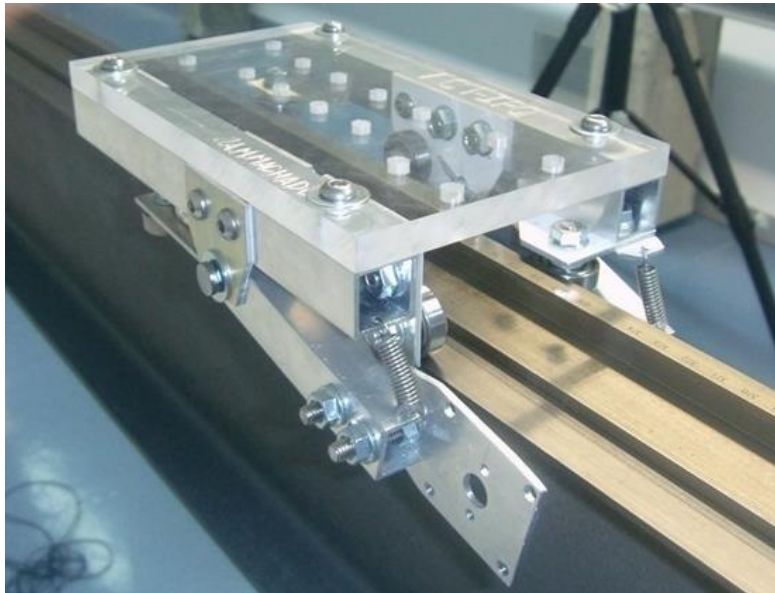
As limitações e necessidades que foram tidas em conta durante o desenvolvimento do dispositivo para a otimização do processo de calibração foram as seguintes:

- Não é possível alterar fisicamente os pilares que suportam o banco de ensaios SIP de 12 m, ou seja, a realização de furos, cortes ou outro tipo de operações que induzam uma modificação na integridade física ou até na aparência deste elemento são de evitar;
- Não é possível realizar qualquer tipo de operação que altere a integridade física do banco de ensaios SIP de 12 m. Basicamente o dispositivo desenvolvido não poderá induzir qualquer alteração física neste elemento, seja durante a sua montagem, operação de calibração ou desmontagem. Fundamentalmente o dispositivo otimizador do processo teve de ser desenvolvido com uma filosofia que permita a montagem e desmontagem rápida, não sendo necessário o uso de qualquer tipo de ferramenta ou processos complexos;
- Reduzir ao máximo os coeficientes de atrito, tanto estático como dinâmico, inerentes ao deslocamento da plataforma que suporta o cubo retrorrefletor;
- Automatizar a translação da plataforma que alberga o cubo retrorrefletor através de um motor, de modo a que o operador não seja obrigado a deslocar-se cada vez que necessita que o cubo retrorrefletor seja transladado;
- Reduzir as folgas inerentes à translação que eram uma referência na plataforma inicial. Estas folgas comprometiam o processo de calibração, pois, se o operador não tivesse um extremo cuidado e um pouco de sorte durante a ação de translação da plataforma, que era efetuada manualmente, o sinal laser podia ser perdido, com a penalização de a calibração ter de ser realizada novamente;
- O dispositivo desenvolvido vai estar sempre localizado no Laboratório de Comprimento, LCO. Apesar deste laboratório apresentar condições ambientais estáveis e ser um local limpo, isento de poeiras ou qualquer outro tipo de impurezas, existe necessidade que o dispositivo seja desenvolvido de modo a que não necessite qualquer tipo de manutenção ou cuidados especiais;
- Procurou-se utilizar materiais existentes no mercado, de fácil aquisição, permitindo assim que haja uma redução de custos aquando da implementação dos mesmos na conceção do dispositivo;
- Na escolha dos materiais foi tida em consideração o incremento de peso que estes poderiam adicionar ao dispositivo. Ou seja, tentar manter o peso do dispositivo desenvolvido, quando comparado com o peso da plataforma inicial, mesmo com todas as otimizações efetuadas.

### 4.3 Dispositivo Desenvolvido

Para corresponder aos requisitos descritos no subcapítulo anterior, foi desenvolvido um dispositivo que não só resolve os problemas relacionados com o atrito como também não é necessária a aplicação de qualquer tipo de lubrificante para o auxílio do seu deslocamento. Este dispositivo desenvolvido apresenta uma combinação de rolamentos dispostos geometricamente em locais estratégicos, que permitem o deslocamento sem vibrações relevantes e eliminam as folgas que eram uma referência da plataforma móvel anterior. Este último ponto é resolvido através de um sistema auto-ajustante, permitindo que a plataforma realize a sua fixação ao banco de ensaios SIP independentemente das imperfeições que este possa apresentar, tendo como referência de posição a face lateral da escala, associada ao banco de ensaios, constituída por uma liga de Invar<sup>3</sup>.

A figura seguinte ilustra o dispositivo que foi desenvolvido no âmbito do trabalho desenvolvido.



**Figura 4.5 – Dispositivo desenvolvido inserido no banco de ensaios**

O uso deste dispositivo para a calibração de sistemas laser interferométricos em distância não requer qualquer alteração física nos pilares que suportam o banco de ensaios, como também não é necessário realizar qualquer tipo de operação que altere a integridade física da viga aquando da sua utilização. Estes dois fatos revelam ser uma grande vantagem inerente a este dispositivo pois, como já foi referido, a viga serve de suporte a outro tipo de calibrações, então a não interferência nas características geométricas e físicas, tanto dos pilares como da viga, é uma grande mais-valia. Através da utilização deste dispositivo, o processo de calibração em distância de sistemas interferométricos não interfere com outras calibrações realizadas no banco de ensaios SIP de 12 m.

---

<sup>3</sup> Liga à base de Níquel e Ferro que apresenta um baixo coeficiente de dilatação térmica

Foi decidido manter a plataforma 37-M da Newport, ilustrada na Figura 4.6, como plataforma principal de posicionamento, para mais detalhes sobre esta escolha consultar o subcapítulo 5.2, *Equipamentos Utilizados*. Para ter uma noção mais concreta de como é a introdução desta plataforma no dispositivo desenvolvido, consultar o Anexo A.

A figura seguinte ilustra a plataforma regulável adjacente ao dispositivo desenvolvido.



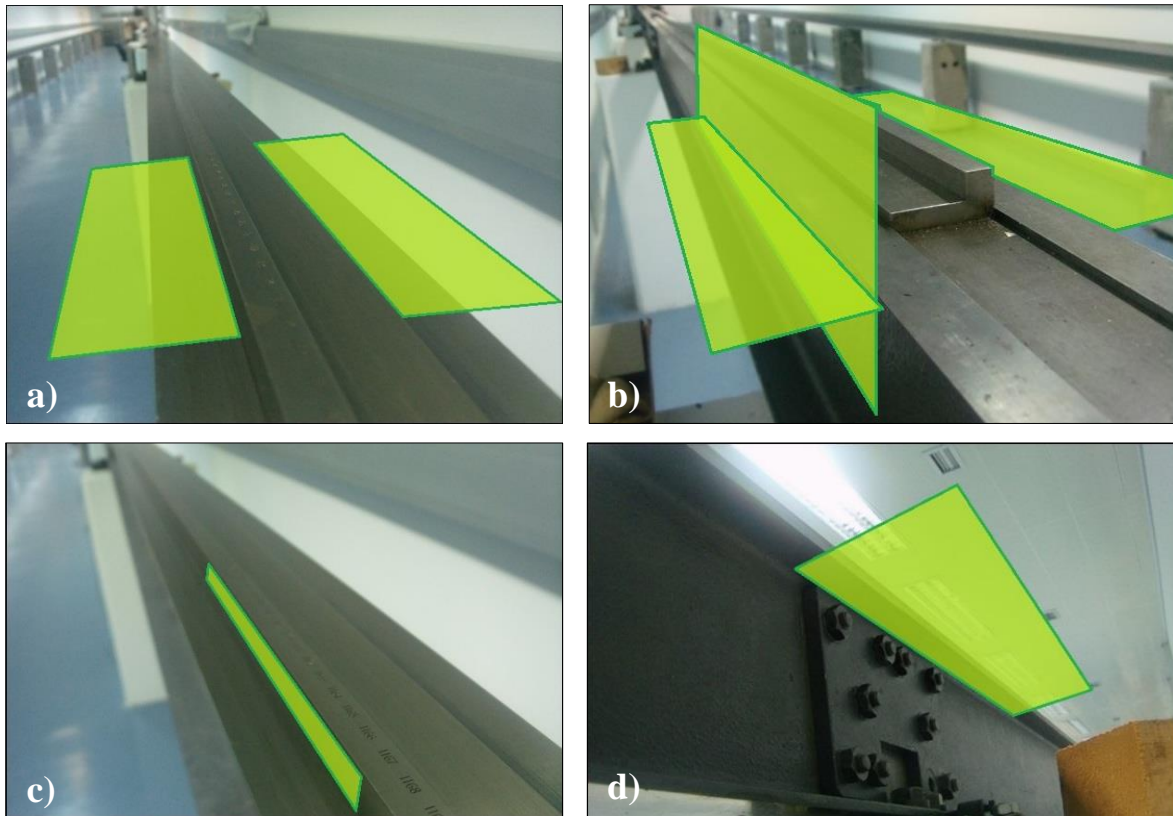
**Figura 4.6 – Plataforma de inclinação e rotação modelo 37-M da Newport.**

### **4.3.1 Fixação e Translação do Dispositivo**

Um dos maiores desafios ligados ao desenvolvimento desta nova plataforma móvel esteve relacionado com a sua fixação ao banco de ensaios. O espaço disponível para o dispositivo fazer o contacto que auxilia diretamente no suporte do seu próprio peso e dos demais elementos referentes à calibração, é extremamente reduzido, como ilustra a Figura 4.7 a). Outro desafio inerente à fixação foi o facto de se pretender desenvolver um dispositivo que possa ser montado e retirado da viga sem nenhuma alteração do banco, desmontagem de elementos do dispositivo ou uso de qualquer tipo de ferramentas.

Fundamentalmente, a fixação do dispositivo no banco é efetuado através de quatro planos principais de contacto, ilustrados na Figura 4.7, a), b), c), d), que se traduzem em oito pontos de contacto efetivo. Destes oito, sete são realizados através de contacto entre rolamento e zonas da viga caracterizadas por aço maquinado, e um através do contacto de uma roda de borracha solidária com o veio do motor e a zona do banco caracterizada por aço corrugado.

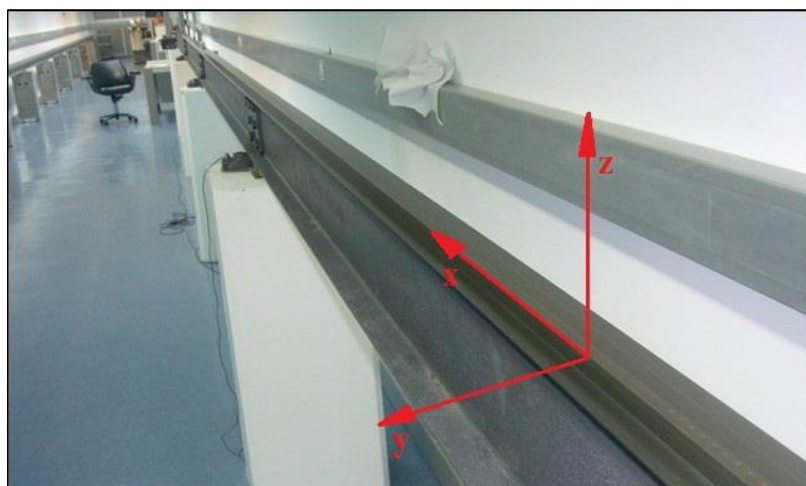
A figura seguinte ilustra os planos de contato principais que foram definidos.



**Figura 4.7 – Planos de contato: a) Plano horizontal superior; b) Plano horizontal inferior e plano vertical direito; c) Plano vertical esquerdo; d) Outra perspectiva do plano horizontal inferior**

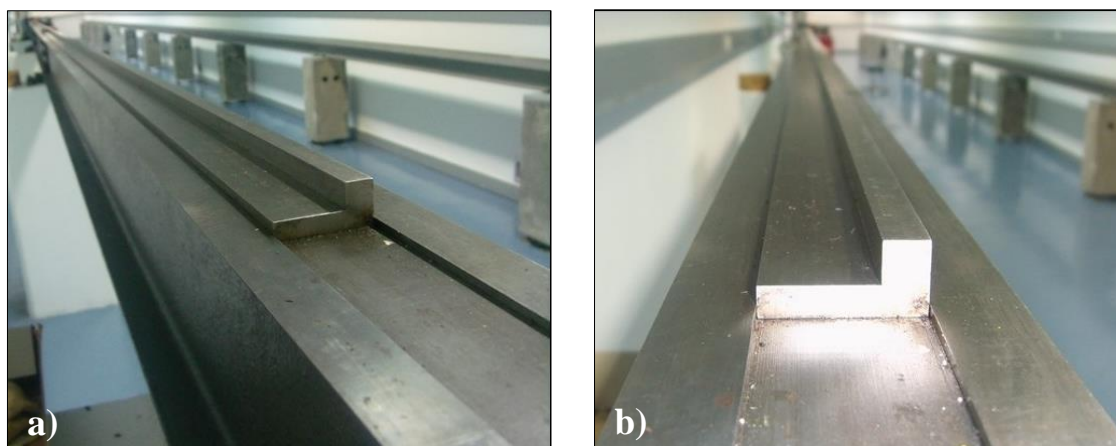
Para uma melhor compreensão do método usado para descrever os graus de liberdade que o dispositivo apresenta, considera-se o sistema de eixos representado na Figura 4.8. Onde o eixo  $x$  representa a direção do movimento de translação do dispositivo e os eixos  $y$  e  $z$  representam direções onde o movimento deste está constringido. Basicamente o dispositivo foi desenvolvido com o intuito de apenas apresentar um grau de liberdade, que se traduz na translação linear apoiada pela escala que o banco de ensaios apresenta.

A figura seguinte ilustra os eixos considerados para uma melhor compreensão da translação e constringimentos realizados.



**Figura 4.8 – Eixos representativos do sistema**

O banco de ensaios SIP de 12 m apresenta uma escala constituída por uma liga de Invar, como se pode verificar na Figura 4.9.



**Figura 4.9 – Escala de Invar associada ao banco SIP de 12 m: a) Perspetiva; b) Pormenor**

Esta escala é o elemento mais retilíneo do sistema constituído pelo banco de ensaios SIP. Para este tipo de calibração, é necessário que os feixes laser estejam sempre alinhados, pois se a plataforma que contém o cubo retrorrefletor apresentar um deslocamento não retilíneo, a calibração é totalmente comprometida. Logo, ao contrário da plataforma inicial, foi decidido que este elemento, escala de Invar, deveria representar a referência incontestável para o deslocamento do dispositivo desenvolvido, que serve de suporte à plataforma regulável da *Newport* que por sua vez contém o cubo retrorrefletor. De facto, sem uma referência precisa para concretizar o movimento de translação do dispositivo, este revela-se completamente inútil ao auxílio da calibração, pois pode provocar o desalinhamento dos feixes laser a qualquer momento.

- **Translação do Dispositivo na Direção do Eixo  $x$**

A deslocação do dispositivo desenvolvido é apenas feita numa direção, como já foi referido, auxiliado através dos constrangimentos que serão descritos nos próximos subcapítulos. Essa translação é efetuada apenas na direção do eixo  $x$ , ilustrado na Figura 4.8. Este movimento é efetuado através de um motor estrategicamente posicionado, onde a transferência de binário é efetuada por uma roda, acoplada ao veio, que apresenta um elemento de borracha ao longo do seu perímetro, ilustrada na Figura 4.10.

A figura seguinte demonstra o elemento de borracha e a roda de plástico que constituem a roda de borracha.



**Figura 4.10 – Roda de borracha**

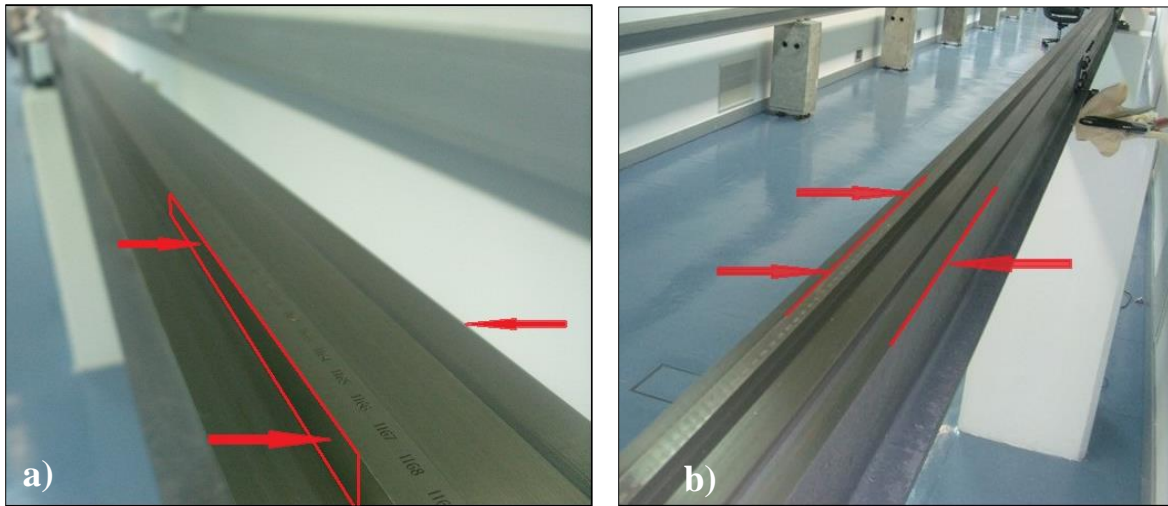
O elemento de borracha faz contacto numa área do banco que é constituído por aço corrugado, possibilitando assim a ampliação dos coeficientes de atrito, dinâmico e estático, aumentando a transmissão de binário permitindo assim uma translação mais eficiente do dispositivo.

De notar que era conveniente que o próprio dispositivo desenvolvido albergasse o motor e seus componentes, possibilitando que no momento em que é acionado o motor, o contacto entre a viga e a roda de borracha permitisse o movimento do dispositivo na direção desejada. Logo, o motor é suportado por um dos elementos constituintes do dispositivo.

- **Fixação do Dispositivo na Direção do Eixo  $y$**

O impedimento de movimento do dispositivo com a direção do eixo  $y$  é realizado na prática pelo do contacto efetuado através de rolamentos. Sabendo que através de três pontos se define um plano, foi criada a fixação do dispositivo nessa mesma direção através de três rolamentos, representando os três pontos de apoio, dois rolamentos na superfície lateral da escala de Invar, e um rolamento numa aresta constituinte do banco de ensaios SIP, como ilustra a Figura 4.11. De notar que esta escala representa a referência do movimento de translação do dispositivo e consequentemente da plataforma que suporta o cubo retrorrefletor. Os dois rolamentos em contacto com a escala de Invar representam elementos fundamentais diretamente relacionados com a posição e translação do dispositivo desenvolvido.

Na figura seguinte são representados alguns dos pontos de contato realizados pelos rolamentos constituintes do dispositivo desenvolvido.



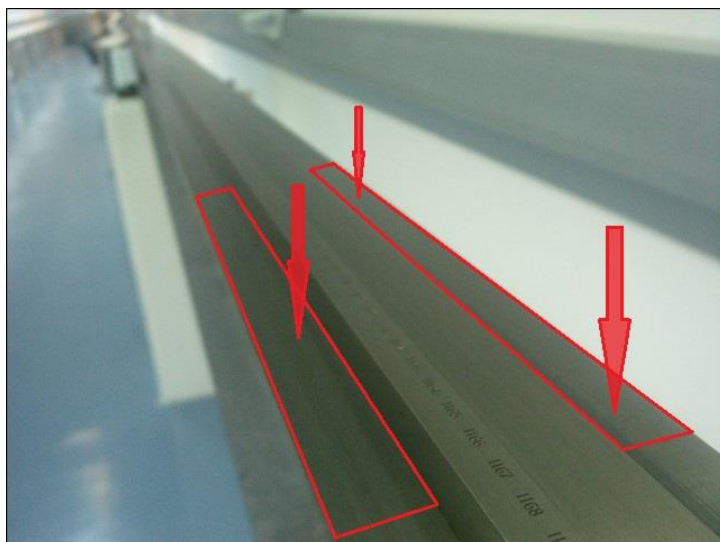
**Figura 4.11 – Representação dos pontos de apoio referentes aos rolamentos: a) Pormenor de apoio na superfície lateral da calha de Invar, plano vertical esquerdo; b) Pormenor de apoio na aresta do banco SIP, plano vertical direito.**

- **Fixação na Direção do Eixo  $z$**

Tal como na fixação do dispositivo descrito anteriormente, o constrangimento na direção do eixo  $z$  é realizado maioritariamente através de rolamentos, pelo que não se pretende que este e, consequentemente, o cubo retrorrefletor que é apoiado pela plataforma 37-M, tenha qualquer movimento nesta direção após o alinhamento dos feixes laser.

Na prática esta fixação é realizada através de quatro rolamentos e por uma roda de borracha, elemento constituinte do motor, que permite o movimento de translação do dispositivo. Na Figura 4.12 estão representados os pontos de contacto teóricos, relacionados com a superfície superior da viga, onde três rolamentos vão assentar. De notar que foram usados apenas três rolamentos pois, como já foi referido, são apenas necessários três pontos para definir um plano.

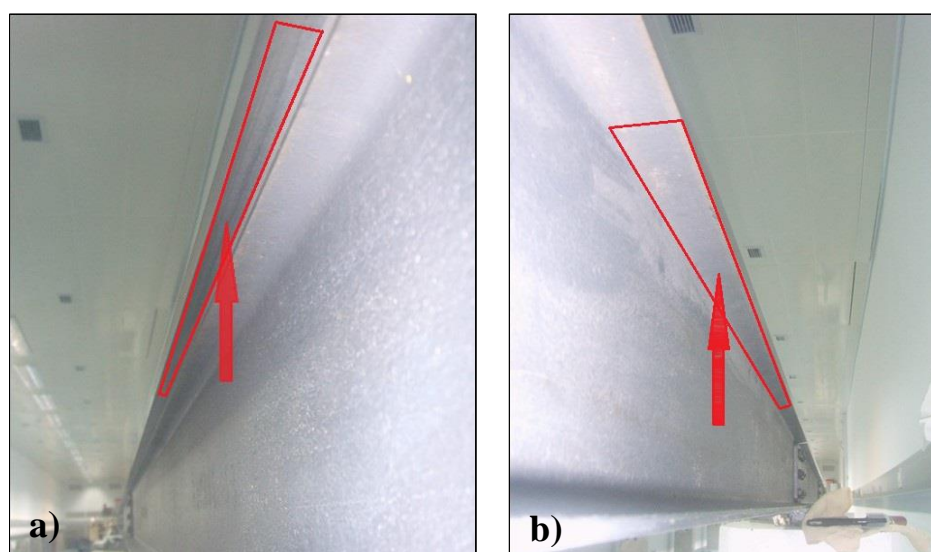
A figura seguinte ilustra os pontos de contato efetivo realizado por rolamentos no plano superior.



**Figura 4.12 – Representação pontos de apoio referentes aos rolamentos no plano horizontal superior**

Naturalmente que o dispositivo fica assim totalmente apoiado através das superfícies superiores do banco. Porém, é necessário salvaguardar a integridade deste em situações que possam ocorrer, pois, do modo como está apoiado qualquer embate que sofra quando montado no banco pode originar a queda, danificando não só o cubo retrorefletor e plataforma adjacente como também o próprio dispositivo desenvolvido. A solução para este problema foi a adição de um rolamento situado estrategicamente na superfície inferior esquerda do banco, que é constituída por aço maquinado, Figura 4.13 a), simulando a ação de um grampo, fixando convenientemente o dispositivo. De notar que a introdução deste rolamento contraria a força que a roda de transmissão, elemento constituinte do motor, imprime no dispositivo no lado oposto, Figura 4.13 b), equilibrando assim o sistema.

A figura seguinte ilustra os pontos de contato no plano inferior, realizados pelo dispositivo.



**Figura 4.13 – Representação dos pontos de apoio inferiores ao banco SIP: a) Apoio referente ao rolamento na superfície (maquinada), plano inferior esquerdo; b) Apoio referente à roda de borracha na superfície (corrugada), plano inferior direito**

- **Conclusão de Fixação**

Através do raciocínio efetuado nos subcapítulos anteriores e tendo em conta as necessidades, especificações técnicas e área disponível para o suporte do dispositivo, foi modelado, através do programa *SolidWorks*, todo o sistema do banco SIP de 12 m, e a partir desse ponto deu-se início ao desenvolvimento do dispositivo.

As figuras seguintes ilustram a modelação virtual relacionada com o sistema do banco SIP de 12 m e o dispositivo desenvolvido. A fixação efetuada em várias direções, elemento auto-ajustante, pontos de apoio e posição do motor e roda de borracha são, também, representados nas figuras seguintes. Para mais detalhes e imagens consultar Anexo A.

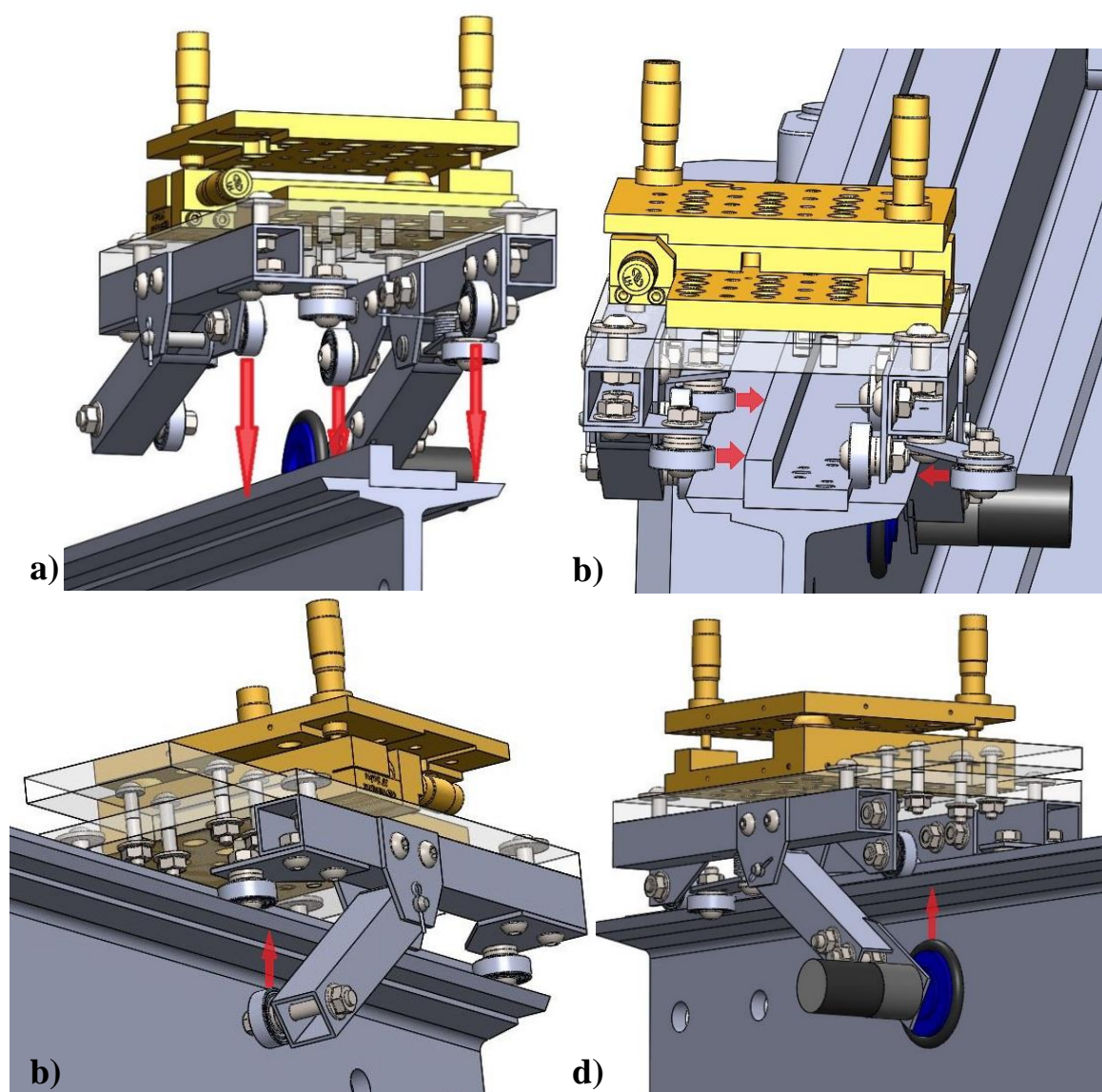


Figura 4.14 – Fixação do dispositivo: a) Fixação na direção do eixo z; b) Fixação na direção do eixo y com sistema auto-ajustante; c) Fixação na direção do eixo z com mola; d) Fixação na direção do eixo z

### 4.3.2 Rolamentos

Uma das grandes necessidades que havia em relação à deslocação do dispositivo estava, necessariamente, relacionada com as forças de atrito envolvidas. Para automatização do processo, um requisito a satisfazer, era necessário o uso de um motor de dimensões reduzidas, pois este estaria acoplado ao dispositivo que suporta a plataforma 37-M e o cubo retrorrefletor. De um modo geral, os motores de dimensões reduzidas encontrados apresentavam, naturalmente, uma potência e binário também reduzidos. Portanto, era imperativo apresentar uma solução que possibilitasse a redução das forças de atrito envolvidas, não só para o aumento da eficiência do processo de calibração em geral, mas também para possibilitar o uso de um motor de dimensões reduzidas. De notar que o uso de um motor deste género apresenta um incremento de peso reduzido e o custo, requisito que necessitava de ser respeitado, foi mantido deste modo em valores facilmente atingíveis.

Os rolamentos introduzidos no dispositivo desenvolvido permitiram que estas necessidades e requisitos fossem satisfeitos. De certo modo, estes representam os elementos mais importantes inerentes ao dispositivo, pois possibilitaram a automatização do mesmo, requisito principal deste trabalho.

O dispositivo foi desenvolvido com a filosofia de que os rolamentos utilizados iriam suportar esforços radiais. Este pressuposto revela-se benéfico quando o custo e a qualidade são fatores a ter em conta aquando da escolha do rolamento a utilizar. Os rolamentos que são dimensionados para suportar esforços radiais, como os rolamentos rígidos de esferas, são de baixo custo e apresentam uma grande versatilidade. De notar que não foi considerado o uso de casquilhos no anel interior do rolamento pois como as montagens e desmontagens do próprio dispositivo vão ser raras e não sendo previsto movimento relativo entre o anel interior do rolamento e o parafuso, considerou-se a hipótese de montagem direta. É claro que isto implicou uma montagem cuidadosa, evitando o contacto direto entre a rosca do parafuso e o anel interior do rolamento.

A decisão de usar rolamentos foi, também, para eliminar a necessidade de aplicação de lubrificante em qualquer elemento que auxilia o processo de calibração, portanto não faria sentido usar um rolamento que não fosse do tipo autolubrificante.

Depois de pesquisa efetuada, com os requisitos e necessidades tidas em conta, foi determinado que o rolamento 627 – 2z, ilustrado na Figura 4.15, era o mais indicado para esta particular situação.

A figura seguinte ilustra o rolamento implementado no dispositivo desenvolvido.



Figura 4.15 – Rolamento 627-2z da SKF

### 4.3.3 Molas

Para o dimensionamento das molas utilizadas no dispositivo desenvolvido, teve-se em conta as forças de atrito envolvidas. Já foi referido que os rolamentos vão induzir um decréscimo considerável das forças de atrito envolvidas durante o deslocamento do dispositivo. Contudo, existe uma situação em que a redução dessas forças não é pretendida. Trata-se do contacto entre a roda de borracha, que apresenta movimento solidário com o veio do motor, e o aço corrugado que caracteriza a zona correspondente ao plano inferior direito, Figura 4.7 d).

O dispositivo apresenta dois tipos de molas: molas de tração e torção. As molas de tração fazem a ligação entre o braço basculante que contém o motor, o braço basculante que contém o rolamento, e o chassis do dispositivo, permitindo que a roda motriz e o rolamento façam um contacto constante na zona inferior do banco. A mola torsional completa o sistema auto-ajustante, possibilitando aos rolamentos de fixação na direção do eixo y um contacto constante na face lateral da escala de Invar, criando, através desta, uma linha de referência para o movimento do dispositivo.

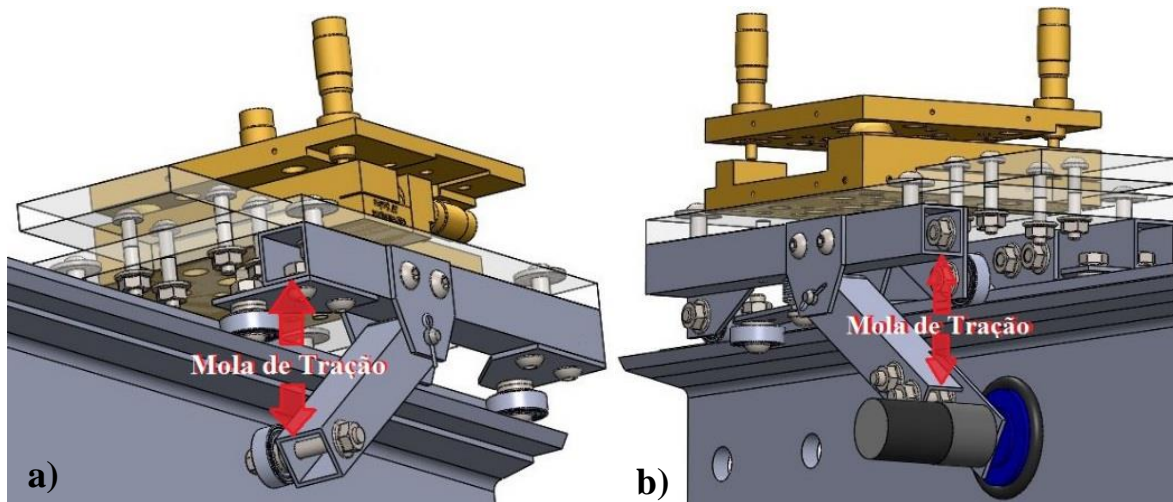
Como um dos requisitos do projeto era manter os custos baixos, decidiu-se não usar molas feitas por medida, mas sim adquirir molas do tipo *standard* de uma empresa de molas, naturalmente com um custo mais acessível.

#### 4.3.3.1 Molas de Tração

De modo a determinar a mola de tração *standard* mais indicada, analisou-se os constrangimentos originados pela função que este elemento tem de desempenhar. Devido a constrangimentos geométricos, que se podem verificar na Figura 4.15, a) e b). A distância entre os pontos de fixação da mola nas duas situações indicadas é aproximadamente 38 mm. Portanto, numa primeira abordagem, o comprimento da mola não pode ultrapassar este valor.

Para que o contacto entre o banco de ensaios e o rolamento, banco de ensaios e roda de borracha, seja efetuado eficazmente, considera-se que uma força de aproximadamente 20 N tem de ser gerada pela mola escolhida. Experimentalmente verificou-se que este valor de força provoca um atrito significativo entre a roda de borracha e o aço. Fundamentalmente, necessitou-se que a mola escolhida produzisse uma força aproximada de 20 N quando tracionada até apresentar um comprimento aproximado de 38 mm.

A figura seguinte ilustra, no modelo virtual do dispositivo, onde as molas estão localizadas.



**Figura 4.16 – Localização da mola de tração: a) Secção esquerda; b) Secção direita**

A energia potencial elástica de uma mola helicoidal sujeita à tração apresenta uma componente devida à torção do arame e outra devida ao esforço transversal, Equação 4.1 [28].

$$U_{pot} = \frac{4 \cdot D_a^3 \cdot N}{d_a^4 \cdot G} \cdot F^2 + \frac{2 \cdot D_a \cdot N}{d_a^2 \cdot G} \cdot F^2 \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde as variáveis apresentam os seguintes significados:

- $U_{pot}$  – energia potencial elástica na mola;
- $F$  – força de compressão exercida na mola;
- $N$  – número de espiras ativas da mola;
- $d_a$  – diâmetro do arame;
- $D_a$  – diâmetro de enrolamento do arame;
- $G$  – módulo de elasticidade torsional do material do arame.

As molas de tração *standard* disponíveis são constituídas por aço inoxidável aisi 302. De acordo com o Shigley [29], para este tipo de aço tem-se,  $G = 69,0 \text{ GPa}$ .

Utilizando o teorema de Castigliano, é possível obter a deformação  $\Delta x$  da mola através da relação  $y = dU/dF$ . Portanto, tem-se [28]:

$$\Delta x = \frac{8 \cdot D_a^3 \cdot N}{d_a^4 \cdot G} \cdot F + \frac{4 \cdot D_a \cdot N}{d_a^2 \cdot G} \cdot F \quad \text{Equação 4.2}$$

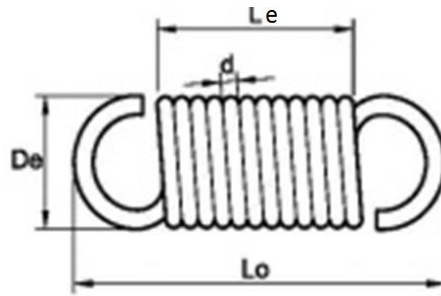
Sabendo que o índice da mola,  $C$ , normalmente verifica  $C \geq 6$  quando não se verificam restrições a nível do diâmetro exterior, e que  $C = D/d$ , pode-se escrever [28]:

$$\Delta x = \left(1 + \frac{1}{C^2}\right) \cdot \frac{8 \cdot D^3 \cdot N}{d^4 \cdot G} \cdot F \simeq \frac{8 \cdot D^3 \cdot N}{d^4 \cdot G} \cdot F \quad \text{Equação 4.3}$$

Se for considerada a aproximação indicada na Equação 4.3, a força na mola pode ser caracterizada pela relação seguinte [28]:

$$F = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot N} \cdot \Delta x \quad \text{Equação 4.4}$$

A Equação 4.4 descreve o comportamento de uma mola helicoidal de arame de secção circular sujeita à tração [28].



**Figura 4.17 – Representação de uma mola helicoidal de arame com secção circular, projetada para esforços e tração. Figura adaptada de [30]**

No catálogo da empresa de molas, as molas *standard* são descritas através das incógnitas ilustradas na Figura 4.17, onde o  $L_0$  corresponde ao comprimento total,  $L_e$  o comprimento de enrolamento,  $D_e$  diâmetro exterior e  $d$  o diâmetro do arame. Exemplo da descrição de uma mola pode ser: L0-9.5xLe-5xDe-2.5xd-0.305.

Convertendo os índices descritos pela Equação 4.4 e os índices referentes à descrição de uma mola *standard* pela empresa de molas, tem-se:

$$D = D_e - d \quad \text{Equação 4.5}$$

$$N = L_e/d \quad \text{Equação 4.6}$$

Substituindo estas definições na Equação 4.4, obtém-se:

$$F = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot (D_e - d)^3 \cdot (L_e/d)} \cdot \Delta x \quad \text{Equação 4.7}$$

Como já foi referido, é necessário que a mola escolhida produza uma força de 20 N quando tracionada até apresentar o comprimento de aproximadamente 38 mm. Ou seja,  $\Delta x + L_0 \approx 38$  mm, onde  $\Delta x$  é obtido através da Equação 4.7, resolvendo-a com  $F = 20$  N e com os valores das restantes incógnitas obtidas através da descrição da mola *standard*.

Foi elaborado um programa em Excel, onde foram introduzidos todos os dados referentes a molas *standard* helicoidais de arame de secção circular, projetadas para tração, disponíveis no catálogo. Após a introdução dos dados de cada mola no programa, este calcula automaticamente quais as molas que podem ser introduzidas no dispositivo de modo a respeitarem os requisitos acima referidos.

Fundamentalmente, o programa assimila os valores de comprimento total, comprimento de enrolamento, diâmetro exterior e diâmetro do arame, calculando  $\Delta x$  através da Equação 4.7, com  $F=20$  N. De seguida realiza a soma entre o comprimento total em repouso de cada mola,  $L_0$ , e o valor da deformação calculada, excluindo todos os valores obtidos acima de 39 mm e inferiores a 37 mm, de modo a escolher uma mola que produza uma força aproximada de 20 N quando apresenta o comprimento aproximado de 38 mm. Por último, é escolhida a mola mais acessível em termos de custo, dentro das que podem ser implementadas no dispositivo. De notar que o módulo de elasticidade torsional,  $G$ , é dependente do material que é constituída a mola, o valor desta característica é retirada do Shigley [29].

Como se pode verificar no Anexo B, das 33 molas estudadas apenas uma, modelo S-1148, está de acordo com os requisitos necessários. É necessário verificar se a mola escolhida suporta os esforços que são solicitados.

A relação entre a tensão de rotura e o diâmetro do arame traduz-se pela Equação 4.8 [28].

$$\sigma_{ROT} = \frac{A}{d^m} \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde:

- $\sigma_{ROT}$  – tensão de rotura do material da mola;
- $A$  – característica do material (apresentada nas unidades: MPa.mm<sup>m</sup>);
- $m$  – característica do material, adimensional;
- $d$  – diâmetro do arame.

Por outro lado, o Shigley propõe uma relação entre a tensão de corte admissível,  $\delta_{ADM}$ , e a tensão de rotura do material, traduzida pela Equação 4.9, para condições de funcionamento estático com molas de aço inoxidável [29].

$$\delta_{ADM} = 0,35 \cdot \sigma_{ROT} \quad \text{Equação 4.9}$$

A tensão de corte admissível é dada por [28]:

$$\delta_{ADM} = k_s \cdot \frac{8 \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot F \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde  $k_s$  representa um fator de concentração de tensões para o efeito do esforço transversal, dado pela Equação 4.11,  $D$  o diâmetro de enrolamento do arame,  $d$  o diâmetro do arame e  $F$  a força a que a mola está sujeita [28].

$$k_s = \frac{2 \cdot C + 1}{2 \cdot C} \quad \text{Equação 4.11}$$

Em que,  $C$ , dado por  $C = D/d$ , representa um índice adimensional da mola [28].

Combinando a Equação 4.8, Equação 4.9, Equação 4.10 e Equação 4.11, obtêm-se a seguinte expressão:

$$\left( \frac{2 \cdot (D/d) + 1}{2 \cdot (D/d)} \right) \cdot \frac{8 \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot F = 0,35 \cdot \frac{A}{d^m} \quad \text{Equação 4.12}$$

Sabendo que o diâmetro de arame da mola escolhida está dentro da gama de valores de 0,3 mm a 2,5 mm onde o aço inoxidável aisi 302 é o material constituinte da mola, através do Shigley obtém-se os valores para as incógnitas, Tabela 4-1 [29].

**Tabela 4-1 – Características dependentes do aço inoxidável 302. Tabela adaptada de [29]**

Material	Gama de Diâmetros de Arame, $d$ (mm)	$A$ , MPa.mm <sup><math>m</math></sup>	$m$
Aço inox. 302	0,3 a 2,5	1867	0,146

Logo, resolvendo a Equação 4.12 em ordem a  $F$ , tendo em conta a Equação 4.5, tem-se:

$$\left( \frac{2 \cdot \left( \frac{6,7 - 0,889}{0,889} \right) + 1}{\left( \frac{6,7 - 0,889}{0,889} \right) \cdot 10} \right) \cdot \frac{8 \cdot (6,7 - 0,889)}{\pi \cdot 0,889^3} \cdot F = 0,35 \cdot \frac{1867}{0,889^{0,146}} \Leftrightarrow F \approx 29 \text{ N}$$

Portanto, a mola escolhida só vai entrar em domínio plástico quando sujeita a esforços iguais ou superiores a 30 N. Na situação em que está aplicada esta está sujeita a esforços de aproximadamente 20 N, não existindo qualquer possibilidade de entrar no domínio plástico.

Logo a mola adotada foi o modelo S-1148 da Empresa de molas, para as situações exemplificadas na Figura 4.16.

### 4.3.3.2 Mola de Torção

Para determinar a mola de torção *standard* mais indicada, foram analisados os constrangimentos apresentados pelo local onde este elemento tem de desempenhar a sua função.

Essencialmente a mola é guiada interiormente por um sistema parafuso/porca, onde a sua escolha teve de ter em conta um diâmetro interno mínimo de 11 mm.

De um modo geral, Equação 4.13 caracteriza um momento de rotação.

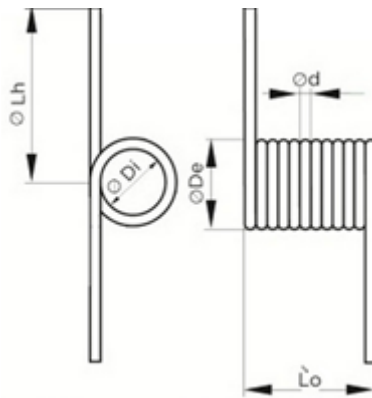
$$T = F \cdot b \quad \text{Equação 4.13}$$

Onde  $T$  representa o momento de rotação,  $F$  a força e  $b$  o braço.

Utilizando o teorema de Castigliano, é possível obter a relação entre a deformação angular e as características da mola, expressa pela Equação 4.14 [28].

$$\theta = \frac{64 \cdot D \cdot N}{d^4 \cdot E} \cdot T \quad \text{Equação 4.14}$$

Em que  $\theta$  refere-se à deformação angular da mola,  $N$  representa o número de espiras da mola,  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal,  $D$  o diâmetro de enrolamento do arame,  $d$  o diâmetro do arame da mola e  $T$  o momento de rotação aplicado na mola [28].



**Figura 4.18 – Representação de uma mola helicoidal de arame com seção circular, projetada para esforços de torção. Figura adaptada de [30]**

No catálogo escolhido, as molas *standard* são descritas através das incógnitas ilustradas na Figura 4.18, onde o  $L'0$  corresponde ao comprimento total,  $L_h$  o comprimento da haste,  $D_e$  diâmetro exterior e  $d$  o diâmetro do arame. Exemplo da descrição de uma mola pode ser: L0-3xDe-11xd-1.245.

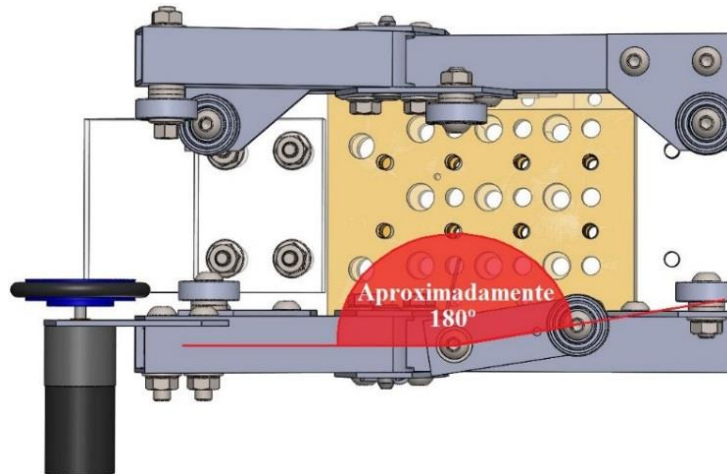
Convertendo os índices descritos pela Equação 4.14 para os índices referentes à descrição de uma mola *standard* de torção pela empresa de molas, tem-se:

$$N = L'0/d \quad \text{Equação 4.15}$$

Substituindo as definições dadas pela Equação 4.5 e Equação 4.15 na Equação 4.14, obtém-se:

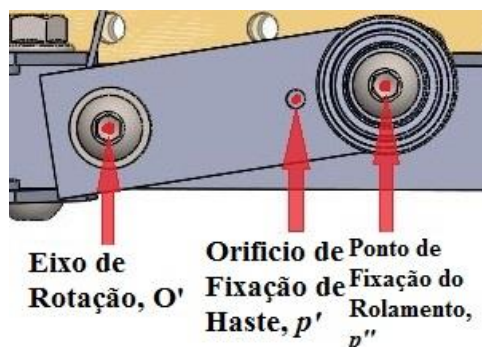
$$\theta = \frac{64 \cdot (D_e - d) \cdot (L'0/d)}{d^4 \cdot E} \cdot T \quad \text{Equação 4.16}$$

Através da Figura 4.19 é possível perceber o nível de deformação que a mola vai sofrer durante o processo de calibração. Sabendo, também, o momento de rotação necessário para que a fixação do dispositivo seja efetuado corretamente, é possível, através da Equação 4.16, determinar se uma mola está de acordo com estes requisitos.

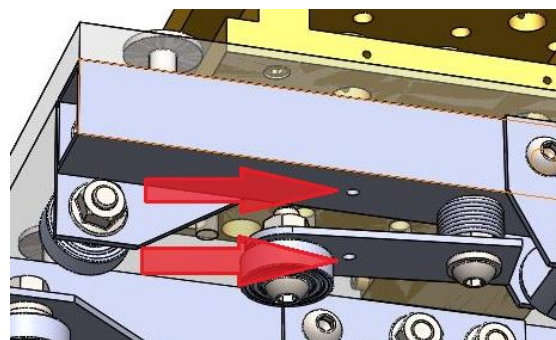


**Figura 4.19 – Ângulo aproximado da deformação da mola de torção durante o processo de calibração**

O rolamento que completa o sistema auto-ajustante tem de imprimir na calha uma força aproximada de 25 N, transferindo-a para os rolamentos que assentam na calha de Invar, fixando o dispositivo totalmente na direção do eixo *y*. Este valor foi determinado experimentalmente na colocação do dispositivo desenvolvido no banco de ensaios SIP. Visualizando a Figura 4.20, o braço efetivo do sistema auto-ajustante,  $l_0'$ , caracterizado pela distância entre o ponto  $O'$  e  $p''$ , apresenta 45 mm de comprimento, e o orifício de fixação das hastes,  $p'$ , está a uma distância de 30 mm do eixo de rotação do sistema,  $O'$ .



**Figura 4.20 – Pontos referentes ao sistema auto-ajustante**



**Figura 4.21 – Localização dos furos para fixação das hastes da mola torsional**

Sabendo a força necessária que a mola tem de imprimir no sistema e o comprimento do braço, é possível, através da Equação 4.13, calcular o momento de rotação requerido. Logo, tem-se:

$$T = 25 \cdot 45 \times 10^{-3} = 1,125 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Foi desenvolvido um programa em *Excel*, que analisa todas as molas deste tipo disponíveis no catálogo da empresa de molas, tendo em conta o diâmetro interno mínimo, bem como todas as restrições acima referidas. Através da Equação 4.16, com todas as características referentes a cada mola em particular e tendo em conta o momento de rotação necessário, é calculado o valor de  $T$  para cada mola quando deformadas de um valor de  $180^\circ$ , aceitando aquelas que apresentem um valor de momento de rotação gerado mais próximo de  $1,125 \text{ N} \cdot \text{m}$ . É considerada aceitável uma mola que produza um momento de rotação dentro de uma gama de valores de  $0,90 \text{ N.m}$  a  $1,35 \text{ N.m}$ , correspondendo a  $20 \text{ N}$  e  $30 \text{ N}$  de força gerada, respetivamente. De notar que módulo de elasticidade longitudinal,  $E$ , é dependente do material que é constituída a mola.

Como se pode confirmar no anexo B, das 9 molas estudadas apenas uma, modelo S-1148, está de acordo com os requisitos necessários. É necessário verificar se a mola escolhida suporta os esforços que são solicitados.

A relação entre a tensão de rotura e o diâmetro do arame é descrita pela Equação 4.8. Porém, no caso das molas de torção, a tensão normal admissível também se relaciona com a tensão normal de rotura. De acordo com o Shigley [29], para molas constituídas por aço inoxidável austenítico, tal como a escolhida, esta relação é dada pela Equação 4.17.

$$\sigma_{ADM} = 0,61 \cdot \sigma_{ROT} \quad \text{Equação 4.17}$$

Onde a tensão normal admissível é dada pela Equação 4.18, para caso de molas de arame com secção circular [28].

$$\sigma_{ADM} = k_i \cdot \frac{32 \cdot T}{\pi \cdot d^3} \quad \text{Equação 4.18}$$

Onde  $k_i$  representa o fator de concentração de tensões para o efeito do enrolamento nos pontos do arame mais próximos do eixo da mola, dado pela Equação 4.19,  $T$  o momento de rotação aplicado na mola,  $d$  o diâmetro do arame e  $C$  o índice da mola [28].

$$k_i = \frac{4 \cdot C^2 - C - 1}{4 \cdot C \cdot (C - 1)} \quad \text{Equação 4.19}$$

Em que,  $C$ , dado por  $C = D/d$ , representa um índice adimensional da mola [29].

Combinando a Equação 4.17, Equação 4.18 e Equação 4.19, obtêm-se a seguinte expressão:

$$\left( \frac{4 \cdot (D/d)^2 - (D/d) - 1}{4 \cdot (D/d) \cdot ((D/d) - 1)} \right) \cdot \frac{32 \cdot T}{\pi \cdot d^3} = 0,61 \cdot \frac{A}{d^m} \quad \text{Equação 4.20}$$

Sabendo que o aço inoxidável 302 é o material constituinte da mola, e que esta apresenta um diâmetro de arame que se encontra dentro da gama de valores de  $0,3 \text{ mm}$  a  $2,5 \text{ mm}$ , é possível obter os valores para as incógnitas através da Tabela 4-1.

Portanto, resolvendo a Equação 4.20 em ordem a  $T$ , tendo em conta a Equação 4.5, obtém-se:

$$\left( \frac{4 \cdot \left( \frac{15,5 - 1,651}{1,651} \right)^2 - \left( \frac{15,5 - 1,651}{1,651} \right) - 1}{4 \cdot \left( \frac{15,5 - 1,651}{1,651} \right) \cdot \left( \left( \frac{15,5 - 1,651}{1,651} \right) - 1 \right)} \right) \cdot \frac{32 \cdot T}{\pi \cdot 1,651^3} = 0,61 \cdot \frac{1867}{1,651^{0,146}} \Leftrightarrow T \approx 426 \text{ N.m}$$

Conclui-se que a mola escolhida só vai entrar no domínio plástico quando sujeita a momentos de rotação iguais ou superiores a aproximadamente 426 N.m. No decorrer do processo de calibração esta mola vai estar sujeita a intensidades de momentos torsores muito inferiores a este valor, não existindo possibilidade de entrar em domínio plástico.

Portanto, a mola de torção adotada foi o modelo S-1614 disponível na empresa de molas escolhida.

#### 4.3.4 Acionamento Automatizado

- **Motor, Bateria e Cabos;**

Como foi referido anteriormente, era necessária a implementação de um motor de pequenas dimensões, que não induzisse um incremento significativo de peso ao sistema e que debitasse um binário suficiente possibilitando a translação necessária do dispositivo desenvolvido. De notar que o requisito de poupança de verbas esteve sempre presente aquando da escolha do mesmo.

Com o uso da plataforma móvel inicial, qualquer motor que fosse implementado para realização da translação tinha de apresentar um binário considerável, tendo em conta que este tinha de contrariar as imensas forças de atrito que eram originadas pelo contacto entre as faces constituídas por alumínio e aço maquinado. Contudo, o dispositivo desenvolvido faz o seu apoio através de rolamentos, permitindo que as forças de atrito sejam reduzidas para intensidades extremamente baixas. Logo, o binário debitado pelo motor implementado pode apresentar valores muito inferiores ao inicialmente previsto.



Figura 4.22 – Motor da marca *Polulu* escolhido [31]

Depois de pesquisa efetuada, chegou-se à conclusão que o motor *Metal Gearmotor HP* da marca *Polulu*, ilustrado na Figura 4.22, era o mais indicado, tendo em conta o custo, dimensões, massa, binário disponível e modo de controlo. É ideal para o controlo do dispositivo desenvolvido pois pode ser acoplado a este. Para fonte de energia apenas necessita de uma bateria de dimensões reduzidas, permitindo o seu acoplamento ao próprio dispositivo, eliminando a necessidade do uso de um cabo de transmissão de energia com um comprimento considerável [31].

Este motor da *Polulu* é projetado para o funcionamento de tensões na ordem 6 V. No entanto, pode operar com valores inferiores ou superiores a esta referência nominal, funcionando confortavelmente numa gama de 3 V a 9 V. Contudo, o uso de uma bateria que debita para o sistema elétrico valores de tensão superiores a 9/10 V pode afetar negativamente o tempo de vida do motor. De notar que o uso de uma bateria com valores de diferença de potencial superiores a 6 V induz um aumento de binário disponível.

Algumas das especificações principais do motor são descritas na tabela seguinte [31]:

**Tabela 4-2 – Especificações do motor escolhido. Tabela adaptada de [31]**

Dimensões, mm (Diâmetro × Comprimento)	Peso, g	Diâm. Veio, mm	Relação de Transmissão	Velocidade de Rotação @ 6 V, rpm	Corrente @ 6 V, mA	Corrente Máxima @ 6 V, mA	Binário Máximo @ 6 V, N.m
25×64	100	4	47:1	210	450	6000	≈0,56

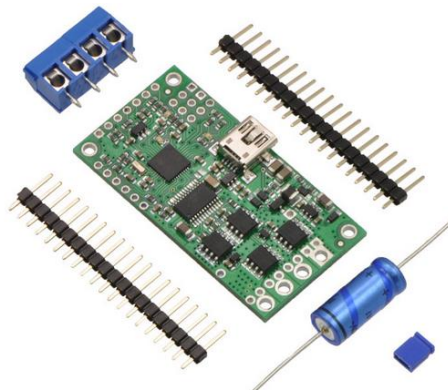
Para fornecimento de potência foi usada uma bateria que possibilitou o funcionamento correto do motor dentro das gamas de tensão recomendadas.

Associado ao controlo do motor foi utilizado um cabo USB de 12 m, onde este permitiu a ligação entre o computador, *software*, e a placa de controlo que comanda o motor.

- **Placa de Controlo**

É necessário realizar o controlo do motor através de um programa desenvolvido pela *Polulu*. É conveniente o uso deste programa pois permite uma customização total do controlo do motor escolhido, onde as características programáveis são descritas no subcapítulo seguinte.

Na prática, este controlo desejado necessita do uso de alguma interface entre o motor e o programa (computador), permitindo o controlo eficaz do dispositivo. A placa de controlo da Populu, denominada de *Simple High-Power Motor Controller 24v12*, ilustrada na Figura 4.23, constitui esta interface pretendida.



**Figura 4.23 – Placa de controlo de motores com potência elevada da *Polulu* e seus componentes [32]**

Esta placa permite o controlo bidirecional de um motor DC, tal como o escolhido. Funciona confortavelmente em gamas de tensão que variam de 5,5 V a 40 V e, em gamas de intensidade de corrente contínua de 7 A a 25 A. Apresenta quatro modos de comunicação para o controlo: interface USB para conceção direta ao PC; interface através de porta série para conexão direta com microcontroladores ou outros controladores embutidos; controle através de ondas rádio para uma conexão direta através de um recetor de ondas rádio; interface de tensão analógica para uma conexão direta com potenciómetros e *joysticks* analógicos [32].

De todas estas características adequadas ao funcionamento do sistema, esta placa de controlo apresenta características adicionais ideais para o controlo particular do dispositivo desenvolvido [32]:

- Permite o controlo da aceleração máxima e desaceleração, possibilitando a redução de vibrações induzidas no cubo retrorefletor no arranque e paragem do dispositivo, evitando o desalinhamento dos feixes laser durante o processo de calibração;
- É possível definir o valor da velocidade inicial, velocidade máxima e intensidade de travagem quando a velocidade do dispositivo é nula, permitindo uma diminuição do *stress* elétrico e mecânico no sistema;
- Apresenta controlos de segurança opcionais para evitar o acionamento inesperado do motor;
- Shutdown* do sistema a valores de temperaturas programáveis;

- v. LED de indicação de erros que possam estar a ocorrer durante o funcionamento.

Algumas características principais desta placa podem ser resumidas na tabela seguinte:

**Tabela 4-3 – Características gerais da placa de controlo escolhida [32]**

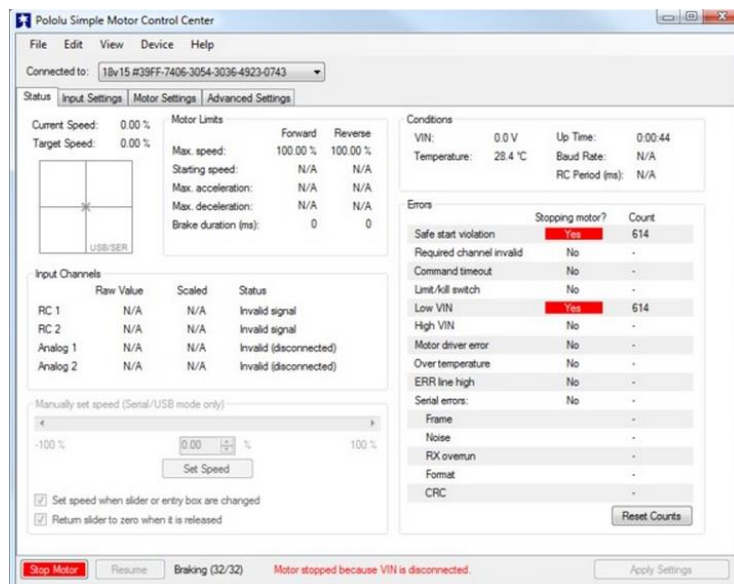
Tensão Máxima Absoluta, V	Tensão Máxima Recomendada, V	Corrente Contínua Máxima, A	Dimensões, mm (Comprimento × Largura)	Peso, g
40	24	12	53×31	7

- **Aplicação Informática Utilizada**

Para o comando através de PC do motor e placa de controlo foi utilizado o programa *Polulu USB Software Development Kit*, disponível no *website* da *Polulu*. Trata-se de um pacote que contém códigos de exemplo para realizar as próprias aplicações em PC para o controlo de outros dispositivos *Polulu* [33].

Este programa permite um controlo bastante personalizado do motor escolhido, ideal para as condições de calibração onde, e.g., a aceleração e desaceleração não devem de ser bruscas de modo a não induzir o desalinhamento dos feixes laser. Permite a introdução de valores relativos às características programáveis descritas no subcapítulo anterior através da seção *Input Settings*.

A figura seguinte representa uma imagem da interface deste programa.



**Figura 4.24 – Interface do programa fornecido pela Polulu**

Dos muitos modos de controlo e personalização do funcionamento do motor, as seguintes opções de indicação de funcionamento destacam-se [33]:

- *Target Speed*: Trata-se da indicação da velocidade que o controlador do motor está a tentar alcançar, totalmente programável;
- *Current Speed*: Trata-se da indicação da velocidade atual com que a placa de controlo está a captar do motor. Existem várias razões pelas quais a *Target Speed* pode ser diferente da *Current Speed*: erros, limites de aceleração/desaceleração, limites máximos de velocidade ou limites de velocidade relacionados com a temperatura máxima permitida para o funcionamento correto da placa de controlo. Tudo o que se poderá verificar que está a limitar a velocidade do motor durante o processo de calibração será automaticamente destacado a amarelo pelo programa;
- *Two-Dimensional Diagram*: Representa um diagrama bidimensional que mostra os valores de características de comando introduzidos pelo operador que são usados para definir a velocidade alvo, *Target Speed*. Fornece, também, uma ideia do quão bem o motor está a operar de acordo as indicações programáveis da placa de controlo;
- *Motor Limits*: Trata-se de um guia do *status*, mostrando os limites durante o movimento do motor. São iguais aos limites especificados no guia de configurações do motor;
- *Input Channels*: Indica o *status* atual dos canais de entrada RC ou analógicos do dispositivo;
- *Conditions Box*: Aponta informações diversas sobre o estado atual da placa de controlo, tais como temperatura, tensão fornecida, tempo de funcionamento e tempo de repouso;
- *Manually Set Speed*: Permite o controlo da velocidade do motor, através de porta USB, utilizando a barra de curso ou introduzindo um valor de velocidade.

### 4.3.5 Produção e Montagem

Por razões construtivas e de disponibilidade foi escolhido alumínio para a constituição dos elementos integrantes da plataforma, ademais este é recomendado para a construção de mesas e plataformas de medição. Noutros elementos foi utilizado acrílico, possibilitando a observação do funcionamento correto dos rolamentos aquando do processo de calibração, ou alguma anomalia que se verifique, sem proceder à remoção do dispositivo, preservando o alinhamento efetuado.

Todos os elementos que fazem parte do dispositivo desenvolvido foram fabricados pelo autor deste trabalho onde a construção de cada peça foi efetuada através da utilização de uma combinação de equipamentos disponíveis nas oficinas do DEMI e ferramentas que o autor deste trabalho possuía. A produção dos elementos com as ferramentas disponíveis revelou-se uma grande mais-valia, pois foram fabricadas a custo zero pelo próprio, eliminando a necessidade de produção por encomenda que por vezes pode ter custos relativos consideráveis. De notar que as molas, rolamentos, cavilhas, troços, parafusos, porcas e anilhas foram os únicos elementos adquiridos, dispensando qualquer processo adicional de fabricação, pois tratam-se de elementos normalizados.

Para uma indicação geral de como foi efetuada a montagem do dispositivo, consultar o esquema de montagem e anexo, Anexo A.

## 5 Procedimento de Calibração

Este capítulo tem como objetivo dar a conhecer a descrição do procedimento a ter em conta para a comparação da indicação de distâncias entre dois sistemas laser interferométricos até a 10 m. Para este tipo de calibração é utilizado o banco de ensaios SIP de 12 m, onde o laser interferométrico a calibrar tem como referência o sistema laser interferométrico da *Hewlett & Packard* [25].

De seguida é realizado, também, um levantamento de todos os equipamentos utilizados durante o processo de calibração em questão, dando a conhecer alguns detalhes sobre cada um e o papel individual que cada um tem neste tipo de calibrações.

Posteriormente é dada uma descrição da montagem usada e do funcionamento do processo de calibração em questão.

### 5.1 Descrição

Uma calibração trata-se da comparação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os indicados por um padrão, que se traduz num equipamento de classe superior, originando uma cadeia de rastreabilidade.

Em resumo, esta calibração em distância consiste em determinar a diferença entre o valor que é indicado, tanto pelo interferómetro a calibrar como pelo interferómetro de referência HP, relativa à distância percorrida pelo cubo retrorrefletor móvel e proceder, de seguida, à avaliação do balanço de incerteza respetivo. Esta calibração pode ser efetuada entre 0 a 3 m com um passo de 0,5 m ou de 0 a 10 m com um passo de 1,0 m [34].

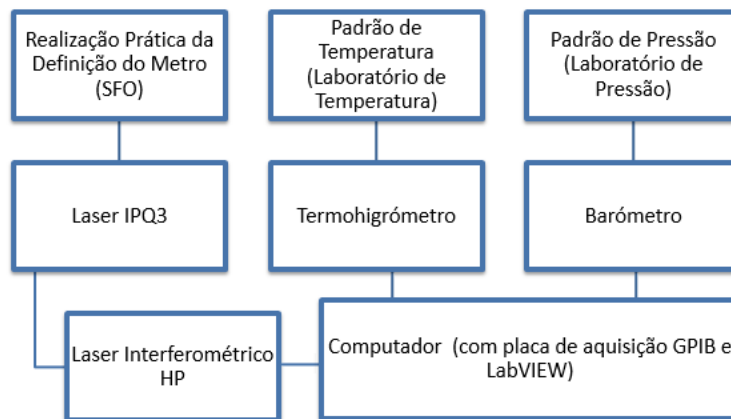
O valor da distância percorrida pelo cubo retrorrefletor que cada um dos lasers interferométricos adquire é indicada num mostrador que complementa cada um destes sistemas. De notar que o dispositivo móvel que suporta o cubo retrorrefletor foi o elemento sujeito ao melhoramento que serviu de fundamento a este trabalho.

Para a comparação dos valores das distâncias indicadas por cada um dos lasers interferométricos é utilizado o fator de correção *VOL*, dado pela Equação 5.1. Para o cálculo deste fator de correção é utilizada a Equação 5.2, denominada de equação de Edlen. Para proceder a esta comparação é realizada a variação dos modos de funcionamento do interferómetro a calibrar, descritos no subcapítulo 5.3.4, *Modos de Funcionamento do Interferómetro*.

A hierarquia da rastreabilidade do método de calibração de laser em distância é dada pela Figura 5.1. No topo da cadeia hierárquica encontra-se o padrão primário, sintetizador de frequências óticas, SFO, e mais dois padrões nas áreas de pressão e temperatura, que permitem definir a

rastreabilidade das medições efetuadas. O SFO serve de padrão ao Laser IPQ 3, situado no IPQ, este, por sua vez, serve de padrão ao Laser Interferométrico HP que serviu de referência ao laser que foi calibrado. O padrão de temperatura situado no Laboratório de Temperatura do IPQ serve de referência à calibração do Termohigrómetro, por sua vez o padrão de pressão situado no Laboratório de Pressão do IPQ serve de referência à calibração do Barómetro utilizado na calibração [34].

A figura seguinte ilustra a cadeia de rastreabilidade do método de calibração efetuado.



**Figura 5.1 – Esquema de Rastreabilidade. Figura adaptada de [34]**

No processo de calibração realizado foram empregues diversos instrumentos associados à medição. Os equipamentos utilizados correspondem a tarefas relacionadas com controlos metrológicos de medidas materializadas de comprimento e processos de calibração. Estes permitiram efetuar a atividade laboratorial nas condições de referência e ambientais requeridas, seguindo as especificações técnicas necessárias que vão ser descritas a seguir.

## **5.2 Equipamentos Utilizados**

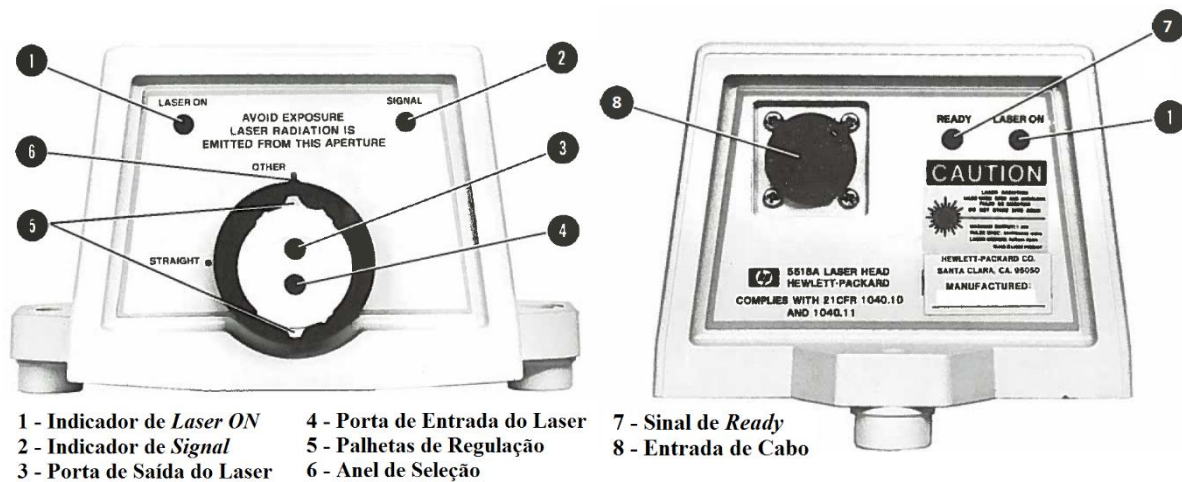
### **5.2.1 Sistema Laser Interferométrico 5528A HP**

Neste subcapítulo são referenciados todos os elementos utilizados durante o processo de calibração que são referentes ao sistema laser interferométrico de referência, HP modelo 5528A.

- **Fonte de Laser, 5518 HP;**

Componente inerente ao sistema laser interferométrico 5228 HP, que contém o dispositivo que permite a produção do feixe laser usado nas medições efetuadas. Abriga, também, o dispositivo de receção do feixe que é forçado ao retorno devido às óticas de medição usadas. Este representa o feixe laser que vai ser tomado como referência na calibração de outros dispositivos laser, ver hierarquia de rastreabilidade Figura 5.1.

A figura seguinte ilustra a fonte de laser do sistema interferométrico HP, destacando os vários indicadores mais relevantes à calibração em questão.



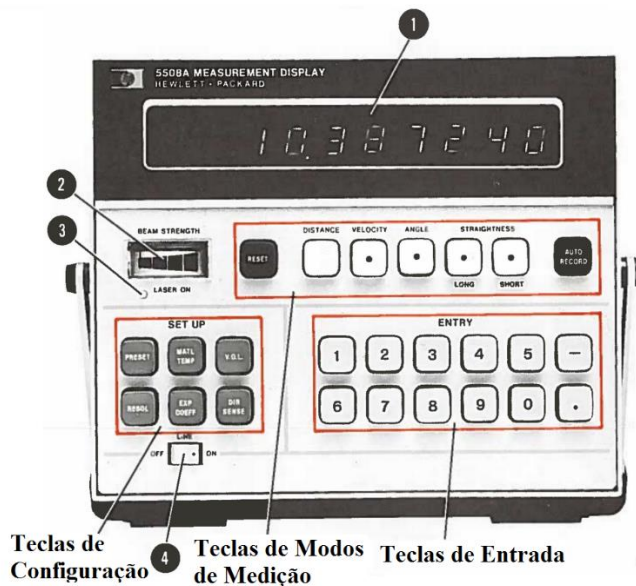
**Figura 5.2 – Fonte laser do sistema HP. Figura adaptada de [25]**

Se o Indicador de *Laser ON* (1) e o Indicador de *Signal* (2) estão acesos, indicam que o laser está ligado e que o sinal do feixe de retorno é suficientemente intenso para efetuar medições, respetivamente. A Porta de Saída do Laser (3) representa a fonte do feixe laser para todo o tipo de medições, podendo servir de porta de entrada no caso de medições de retitude, já a Porta de Entrada (4) representa o destino do feixe laser para medições de distância, velocidade e ângulos. As Palhetas de Regulação (5) permitem, com a sua rotação, a seleção do diâmetro do feixe laser emitido de um máximo a zero já o Anel de Seleção (6), permite a seleção entre as opções de “*OTHER*” – para efetuar medições lineares, angulares e de velocidade, e “*STRAIGHTNESS*” – para efetuar medições de retitude. Por último, o Sinal de *Ready* (7) permite saber se o laser está estabilizado através de uma luz, pois se esta for intermitente o laser ainda não está estabilizado o suficiente para efetuar medições, e a Entrada de Cabo (8), permite a ligação deste elemento, através de um cabo próprio, à unidade de controlo [25].

- **Unidade de Controlo, 5518A HP;**

Trata-se de uma unidade de controlo, que para além de fornecer energia e permitir o controlo do dispositivo de Fonte de Laser, 5518A HP, converte informação sobre as medições, efetuadas através deste, num número que representa uma unidade de comprimento, segundo ou ângulo [25].

A figura seguinte ilustra a unidade de controlo do sistema interferométrico HP, destacando as várias teclas e indicadores mais relevantes à calibração em questão.



Teclas de Configuração 4 Teclas de Modos de Medição Teclas de Entrada  
 1 - Mostrador de Valores de Medição 3 - Indicador do Estado da Unidade Laser  
 2 - Mostrador de Intensidade do Feixe Laser 4 - Tecla de *On/Off*

**Figura 5.3 – Unidade de controlo do sistema HP. Figura adaptada de [25]**

O grupo das Teclas de Modos de Medição permitem o selecionar de quatro tipos e medição, contudo apenas uma de cada vez. O grupo das Teclas de Entrada permite a introdução manual de valores definidos automaticamente pela unidade de controlo. Por último, as Teclas de Configuração permitem a manipulação dos valores de medição, através do fornecimento do valor do VOL, compensação de expansão térmica, resoluções diferentes, entre outras características [25].

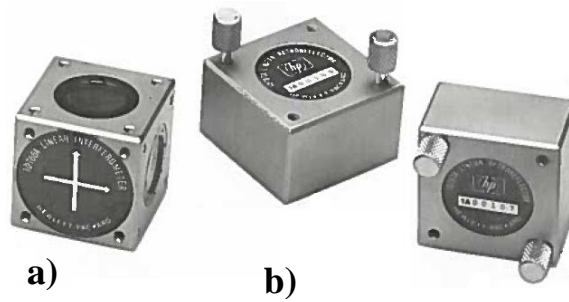
No painel traseiro está localizada uma porta GPIB que permite o envio do valor apresentado no visor para um computador externo [25].

- **Componentes Óticos, 10766A HP, 10767A HP**

Para a realização de medições lineares, que auxiliam diretamente no processo de calibração, através do sistema interferométrico laser, é necessário o uso de três componentes óticos. Dois retrorefletores lineares, 10767A HP, e um divisor de feixe linear, 10766A HP, representam estes três elementos óticos.

O divisor de feixe linear é um componente ótico cuja função é separar as duas componentes da frequência do feixe laser primário em duas componentes ortogonais. Por outro lado, os dois cubos retrorefletores lineares, ilustrados na Figura 5.4, apresentam a função de refletir as componentes do feixe laser de novo para o divisor de feixe linear.

Na figura seguinte são ilustrados os componentes óticos utilizados na calibração de sistemas interferométricos efetuada.

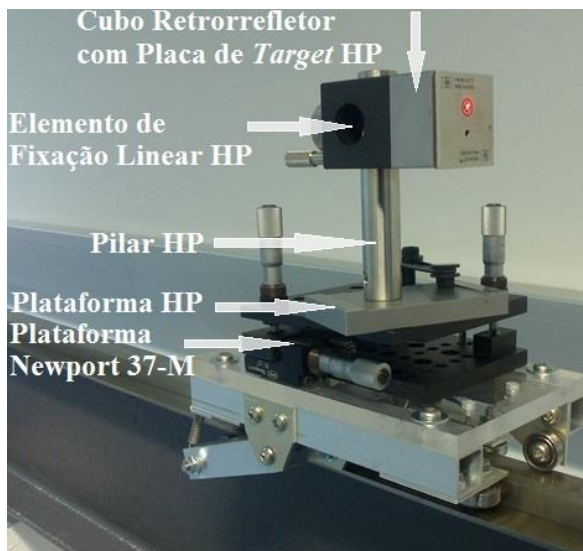


**Figura 5.4 – Componentes óticos: a) Divisor de feixe linear HP; b) Cubos retrorrefletores lineares HP. Figura adaptada de [25]**

- **Componentes de Fixação, 10784A HP, 10785A HP, 10786A HP;**

Os elementos que permitem a fixação e posicionamento correto do cubo retrorrefletor linear móvel à plataforma da Newport são os pilares, a base e o elemento de fixação linear, ilustrados na Figura 5.6. De uma forma geral, os pilares apresentam um fuso macho e fêmea localizados em extremidades opostas, e a base apresenta um fuso fêmea. O aparafusamento dos pilares na base permite a criação de um sistema que garante um nível de perpendicularidade suficiente entre o eixo do pilar e o plano da base, posicionando assim o cubo paralelamente ao plano da base, como ilustra a Figura 5.5.

As figuras seguintes representam os elementos de fixação individuais bem como a montagem para a o posicionamento correto do cubo retrorrefletor.



**Figura 5.5 – Montagem dos pilares com a base e elemento fixação linear, suportando o cubo retrorrefletor**



**Figura 5.6 – Elementos de fixação. Figura adaptada de [25]**

O elemento fixação linear dá acoplamento ao cubo retrorrefletor móvel, podendo, de seguida, ser fixado ao pilar HP, completando o sistema de fixação.

- **Tripé, 10753A HP;**

Para além de todos os elementos óticos usados, é necessário, para o processo de calibração, o posicionamento correto do laser a calibrar. O tripé da HP, permite o posicionamento correto, contendo vários fusos e manivelas para o ajuste da posição do dispositivo laser nas três dimensões, auxiliando o alinhamento dos feixes.

A figura seguinte ilustra este mesmo tripé salientando algumas das suas características mais relevantes para o posicionamento correto da unidade laser HP.



Figura 5.7 – Tripé e suas principais manivelas. Figura adaptada de [25]

## 5.2.2 Sistema Laser Interferométrico Splindler & Hoyer

De modo a realizar os ensaios para validação do dispositivo desenvolvido, é necessário utilizar um sistema interferométrico secundário que vai ser sujeito à calibração. O laser interferométrico da marca *Splindler & Hoyer*, modelo ZLI 150, que é posse do IPQ, foi o sistema a calibrar escolhido.

O *Splindler & Hoyer* trata-se de um laser interferométrico idêntico ao HP. Apresenta sensores de temperatura, pressão e humidade, independentes dos sensores do HP permitindo a aquisição destes valores de modo a calcular o seu próprio coeficiente de correção, com a finalidade de indicar uma distância comparável ao sistema interferométrico de referência .

Apresenta, também, elementos de posicionamento e fixação inerentes, tais como: tripé regulável e peças de fixação próprias.

### 5.2.3 Banco de Ensaios, SIP

Ao utilizar o sistema interferométrico HP, o banco de ensaios SIP de 12 m permite efetuar medições lineares até 10 m. Ou seja, permite que sejam calibrados sistemas interferométricos de 0 a 3 m ou de 0 a 10 m. Entre as várias características físicas que apresenta, a mais notável é o facto de possuir uma escala de Invar, ilustrada na Figura 5.8, que serve de referência à posição e translação do dispositivo desenvolvido neste trabalho.

A figura seguinte ilustra o banco de ensaios utilizado nas calibrações que se efetuaram neste trabalho, bem como a sua escala de Invar associada.

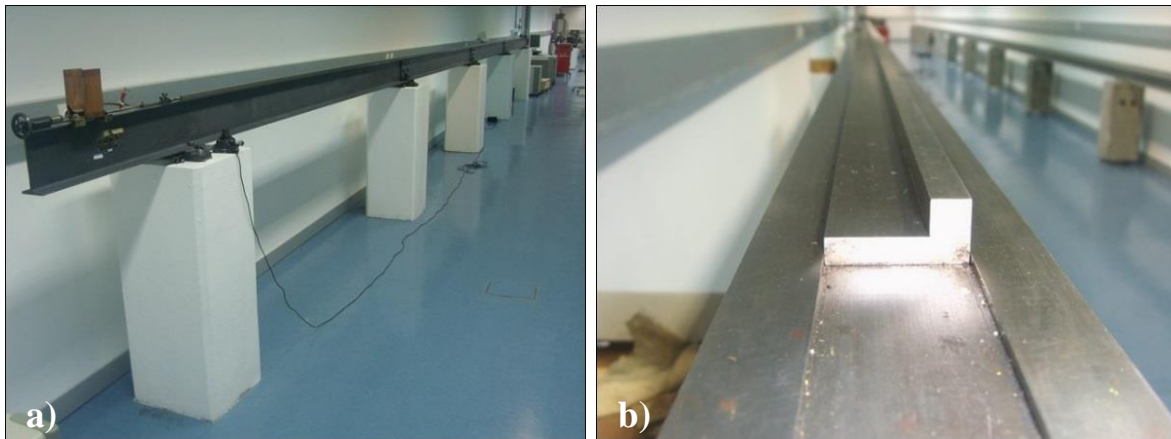


Figura 5.8 – Banco de ensaios SIP de 12 m: a) Perspetiva do banco; b) Pormenor de escala de Invar associada

### 5.2.4 Barómetro, Druck DPI 141

Para medir a pressão atmosférica, requerida pelo processo de calibração, foi utilizado o barómetro da marca Druck modelo DPI 141, ilustrado na Figura 5.9.



Figura 5.9 – Barómetro Druck DPI 141

Este barómetro apresenta uma resolução de 0,01 mbar, permitindo a escolha de várias gamas de medição. Os dados obtidos por este elemento podem ser adquiridos por computador, via porta GPIB [35].

### 5.2.5 Termohigrómetro, Fluke 1620A

Este elemento permite a medição da temperatura e humidade ambiente num só aparelho. Realiza medições de temperatura com resolução de  $\pm 0,125$  °C e medições de humidade com resolução de  $\pm 1,5$  %, através de dois canais independentes para não constatar interferência entre as duas leituras. Exibe os valores das medições através de um ecrã de dimensões consideráveis, onde se pode escolher vários modos de leitura. Apresenta, também, uma porta série que permite aquisição dos valores medidos por parte do interferómetro HP [36].

A figura seguinte ilustra o mostrador e o chassis do aparelho descrito anteriormente.



Figura 5.10 – Pormenor do mostrador do termohigrómetro Fluke [36]

### 5.2.6 Computadores

Um dos computadores utilizado permite o armazenamento de dados dos mais diversos equipamentos usados através de um conversor GPIB-USB. É ainda responsável pela translação do dispositivo desenvolvido neste trabalho, através de um programa personalizável, permitindo um controlo total deste sem que o técnico tenha de se deslocar durante todo o processo de calibração. De notar que é utilizado, também, um programa desenvolvido em *LabVIEW* que recolhe os dados do laser interferométrico HP, do termohigrómetro e do barómetro.

O outro computador disponível, com sistema MS-DOS, permite a indicação da distância medida por parte do sistema laser a calibrar, Splindler & Hoyer, possibilitando ainda a alteração de uma panóplia de características inerentes a este.

## **5.2.7 Plataforma Regulável, Newport 37-M**

Este elemento, ilustrado na Figura 4.6, apresenta o suporte e posicionamento do cubo retrorrefletor como tarefa principal. Apresenta uma liberdade total em três eixos com orientação angular de aproximadamente 4°. Contém dois micrómetros de ajuste de inclinação mais um micrómetro de ajuste de rotação, permitindo a orientação paralela a um plano arbitrário de um componente que esteja assente na mesma, que neste caso é a base HP que por sua vez dá o suporte ao cubo retrorrefletor. Ao tirar partido dos três eixos XYZ esta permite o fornecimento de seis graus de liberdade para uma capacidade de posicionamento total do cubo, ideal para o processo de calibração em questão. Pois, aquando do processo de alinhamento dos feixes laser é vantajoso possuir estes graus de liberdade para permitir o posicionamento correto do cubo retrorrefletor móvel [37].

## **5.2.8 Dispositivo de Translação**

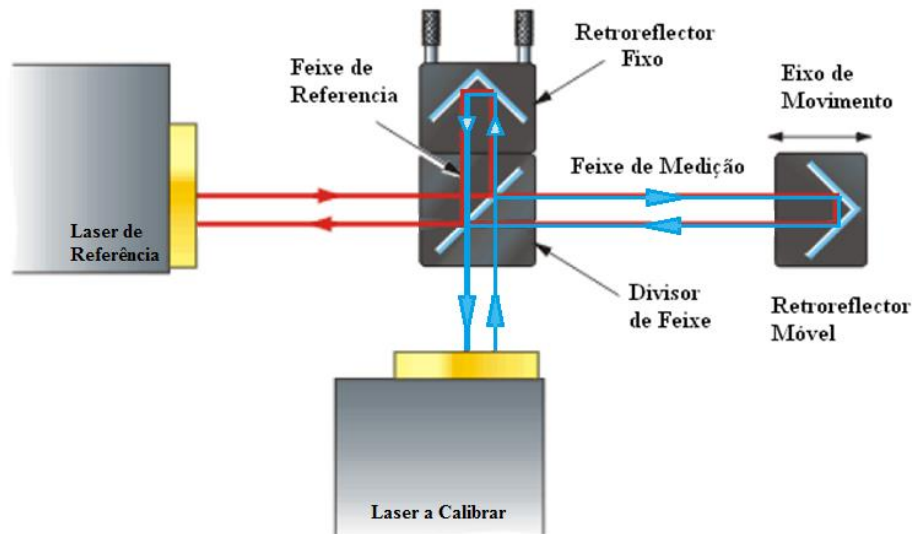
Trata-se do dispositivo desenvolvido através deste trabalho que permite o suporte e a translação automatizada do cubo retrorrefletor, melhorando o processo de calibração em questão. Para mais detalhes consultar do capítulo 4, *Pormenores Construtivos do Dispositivo*.

## **5.3 Descrição do Modo Operatório**

### **5.3.1 Montagem Esquemática e Funcionamento**

Na calibração de sistemas laser interferométricos em distância é apenas utilizado um só conjunto de sistemas óticos, ou seja, dois cubos refletores e um divisor de feixe. Estes elementos são partilhados pelos dois sistemas interferométricos laser, constituídos pelo laser de referência e o laser a calibrar.

A seguinte figura representa o esquema teórico da montagem em questão.



**Figura 5.11 – Esquema da configuração de montagem do processo de calibração efetuado**

Os dois feixes laser, que são perpendiculares entre si, incidem sobre o divisor de feixe. Sendo que o divisor de feixe é polarizador, este transmite os feixes com polarização vertical e reflete os feixes com polarização horizontal. Deste modo, a polarização vertical do laser de referência é transmitida pelo divisor de feixe tomando o caminho ótico até ao cubo retrorefletor móvel, e a polarização horizontal é refletida em direção ao cubo retrorefletor fixo. Relativamente ao feixe proveniente do laser a calibrar, este incide perpendicularmente sobre o divisor de feixe em relação ao eixo de deslocamento do cubo retrorefletor móvel, a polarização vertical é transmitida pelo divisor de feixe para o cubo retrorefletor fixo, sendo que a outra componente da polarização é refletida para o cubo retrorefletor móvel. Esta organização das polarizações permite que, em cada braço do interferómetro, os dois feixes provenientes do laser a calibrar e do laser de referência se propaguem com polarizações ortogonais entre si, garantindo assim a inexistência de interferências entre si [2].

No entanto, o divisor de feixe não é capaz de refletir totalmente a polarização horizontal. Ou seja, este elemento transmite cerca de 10% da polarização horizontal e reflete cerca de 10% da polarização vertical, permitindo que cerca de 10% destas duas componentes referentes ao feixe laser de referência são direcionados para o laser a calibrar, o mesmo se passa nos feixes do dispositivo laser a calibrar. Esta situação é resolvida através do ajuste do alinhamento do laser de referência de modo a que esses 10% não incidam na porta de entrada do dispositivo laser a calibrar [2].

### **5.3.2 Procedimento de Início de Montagem**

Para dar início ao processo de calibração é necessário efetuar a ligação do sistema interferómetro HP, montando todos os acessórios óticos paralelamente ao banco SIP de 12 m. De

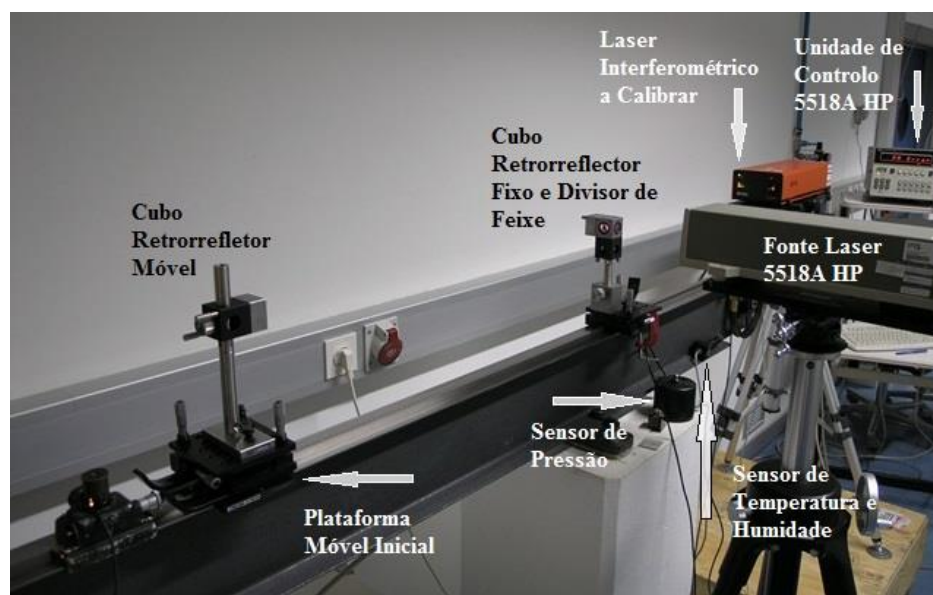
seguida colocar o cubo retrorrefletor no sistema móvel desenvolvido, constituído pelo dispositivo, plataforma Newport, base HP e pilares HP. Depois, montar o divisor de feixe e o cubo retrorrefletor fixo o mais próximo possível da saída do feixe laser do interferómetro de referência.

Com o sistema interferométrico HP e seus componentes posicionados, montar o interferómetro laser a calibrar e os acessórios deste paralelamente aos do interferómetro de referência, como ilustra a Figura 5.12.

De seguida, ligar os dois sistemas e proceder ao alinhamento do percurso ótico dos interferómetros necessários para a medição de distâncias. Ou seja, alinhar os feixes respetivos para que as unidades de controlo de cada um leiam a distância ao longo de todo o percurso a calibrar.

Por último, posicionar os dispositivos de medição de temperatura, humidade e pressão, junto à área de trabalho.

A figura seguinte ilustra a montagem para a calibração de sistemas interferométricos efetuada neste trabalho.



**Figura 5.12 – Fotografia da montagem de alguns elementos referentes ao processo de calibração**

Foi necessário definir os intervalos nominais de indicações a comparar com um intervalo mínimo de 500 mm, se o laser for calibrado até 3 m. Cada ciclo de medição correspondente ao registo das indicações dos dois interferómetros para as distâncias de 0 a 3 m, com passo de 500 mm e no sentido inverso, de 3 m a 0 m [34].

Por outro lado, na comparação para calibração até 10 m, o passo mínimo a efetuar é de 1 m. Ou seja, o ciclo de medição correspondente ao registo das indicações dos dois interferómetros para as distâncias de 0 a 10 m é efetuada com passo de 1 m e no sentido inverso, de 10 m a 0 m [34].

Podem ser definidos outros intervalos de estudo, de acordo com especificações do cliente [34].

### 5.3.3 Condições Ambientais

Para efetuar os ensaios é necessário respeitar condições de referência, que para a temperatura o valor de referência é de 20°. Sendo que as condições para efetuar os ensaios respeitam o facto de que se a temperatura ambiente do laboratório variar entre 19 °C e 21 °C e, a variação desta for inferior a 0,5 °C, é possível a realização dos ensaios [34].

### 5.3.4 Modos de Funcionamento do Interferómetro

Durante o processo de calibração, podem ser utilizados três modos de funcionamento do interferómetro a calibrar com o propósito de estimar as características e a exatidão relacionada com a capacidade dos interferómetros em avaliar a distância medida em função da correção do índice de refração do ar. Os modos de funcionamento são os seguintes [34][25]:

- Modo A

Neste modo os sensores originais que avaliam as condições ambientais previstas pelo fabricante do sistema laser, são conectados à unidade de controlo deste que, por sua vez, efetua automaticamente a correção do índice de refração.

- Modo B;

Neste modo os valores de temperatura, pressão e humidade são introduzidos na unidade de controlo do laser interferométrico. Estes valores são obtidos através de sensores externos ao sistema interferométrico laser, ou seja os sensores deste sistema são desligados. Nos casos em que a unidade de controlo não permita a introdução destes valores, é possível introduzir um fator de correção designado por VOL, que é representado pela Equação 5.1.

$$VOL = \left( \frac{1}{m} - 0,999 \right) \cdot 10^6 \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde  $m$  representa o índice de refração do ar, determinado pela expressão de *Edden*, Equação 5.2.

$$m = 0,3836391 \cdot p \cdot \left[ \frac{1 + 10^6 \cdot p \cdot (0,817 - 0,0133 \cdot T)}{1 + 0,0036610 \cdot T} \right] - 3,033 \cdot 10^{-3} \cdot H$$

**Equação 5.2**

$$\cdot e^{0,057627 \cdot T}$$

Onde  $p$  representa a pressão,  $T$  a temperatura e  $H$  a humidade, tudo valores referentes ao ambiente laboratorial onde o processo de calibração decorre. Estes valores são determinados através dos equipamentos devidamente calibrados.

- Modo C;

Neste modo é desligada a opção que permite que o laser a calibrar faça a compensação automática, ou seja, o interferómetro opera com valores padrão estabelecidos pelo fabricante. Através destes valores é calculada a compensação a introduzir sobre a distância medida utilizando a fórmula de *Edlen*.

## 5.4 Aceitação ou Rejeição de um Valor de Aquisição

O critério para a aceitação de uma medição que foi realizada segundo o procedimento descrito tem como base a comparação das distâncias medidas. As diferenças de indicações entre o laser a calibrar e o laser de referência no “ponto zero” e no início e final de cada ciclo de medição representam as etapas principais de comparação [34].

O valor obtido relacionado com esta diferença deverá ser inferior a cinco vezes a resolução do dispositivo indicador do laser de referência, tendo como penalização o chumbo no certificado de calibração do laser a calibrar [34].



## 6 Resultados

### 6.1 Avaliação de Incertezas de Medição do Processo de Calibração

Relativamente ao processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância o balanço de incertezas é realizado tendo em conta as grandezas que contribuem para a incerteza-padrão com a dependência do valor nominal,  $L$ , percorrido pelo cubo retroreflector móvel, e as grandezas que contribuem de forma independentes ao valor nominal.

Para o cálculo da incerteza de medição expandida,  $U$ , foram tidas em conta as seguintes fontes de incerteza significativas no processo de calibração de sistemas laser interferométricos:

#### 6.1.1 Contribuição para a Incerteza-Padrão de Componentes com Dependência do Valor Nominal $L$

##### 6.1.1.1 Índice de Refração do Ar

- **Equação de Edlen;**

A incerteza-padrão associada à fórmula de Bengt-Edlen é de  $10^{-8}L$ , dada pela Equação 6.1, com  $L$  expresso em mm. Tendo em conta que este valor apresenta um intervalo de confiança equivalente a 95% [34].

$$u_{eq} = 1 \times 10^{-5} \cdot L \text{ (}\mu\text{m/mm)} \quad \text{Equação 6.1}$$

- **Temperatura do Ar, °C**

A incerteza-padrão combinada atribuída à influência da temperatura do ar é dada pela Equação 6.2 [34].

$$u_{tar} = \delta t \cdot c_i \cdot L \quad \text{Equação 6.2}$$

Onde,  $\delta t$  representa a incerteza-padrão associada ao certificado de calibração do sensor de temperatura do termohigrómetro, e  $c_i$  corresponde ao Coeficiente de Sensibilidade, dado por  $c_i = 9,50 \times 10^{-7}$  (L/°C) [34].

- **Pressão do Ar, Pa**

A incerteza-padrão combinada relativa à pressão é dada pela Equação 6.3 [34].

$$u_{par} = \delta p \cdot c_i \cdot L \quad \text{Equação 6.3}$$

Onde,  $\delta p$  representa a incerteza-padrão associada ao certificado de calibração do barómetro, e  $c_i$  corresponde ao Coeficiente de Sensibilidade, dado por  $c_i = 2,68 \times 10^{-9}$  (L/°C) [34].

- **Humidade do Ar, %**

Para a medição da humidade do ar foi utilizado um termohigrómetro. A incerteza-padrão combinada no certificado de calibração do termohigrómetro utilizado no processo de calibração foi de 0,25%, dada pela Equação 6.4 [34].

$$u_{h_{ar}} = \delta h \cdot c_i \cdot L \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde,  $\delta h$  representa a incerteza-padrão associada ao certificado de calibração do termohigrómetro, e  $c_i$  corresponde ao Coeficiente de Sensibilidade, dado por  $c_i = 8,49 \times 10^{-9}$  (L/%) [34].

- **Conclusão;**

A contribuição da componente da incerteza-padrão associada ao índice de refração do ar é dada pela Equação 6.5 [34].

$$u_{ar} = \sqrt{u_{eq}^2 + u_{tar}^2 + u_{par}^2 + u_{har}^2} \quad \text{Equação 6.5}$$

### 6.1.1.2 Comprimento de Onda

O valor para a incerteza-padrão associada ao comprimento de onda, dado pela Equação 6.6, está associado à incerteza-padrão que é associada à frequência e indicada no certificado de calibração do interferómetro laser de referência, HP [34].

$$u_{\lambda} = c_i \cdot u_f \cdot L \text{ (}\mu\text{m)} \quad \text{Equação 6.6}$$

Com,

$$c_i = -\frac{c}{f^2} \quad \text{Equação 6.7}$$

Onde  $c_i$  corresponde ao Coeficiente de Sensibilidade,  $u_f$  a incerteza-padrão associada à frequência,  $c$  a velocidade da luz ( $2,99792458 \times 10^8$  m/s) e  $f$  o valor de frequência do interferómetro laser HP [34].

### 6.1.1.3 Erro do Coseno

Este erro está presente quando se efetuam medições lineares com o sistema laser através do dispositivo móvel, e verifica-se uma mudança do espaçamento entre os dois feixes laser que incidem no orifício da unidade laser [25].

O erro do coseno é expresso em  $\mu\text{m}$  e dado pela Equação 6.8 [34].

$$u_{cos} = \frac{S^2}{8 \cdot D^2} \cdot L \quad \text{Equação 6.8}$$

Onde  $D$  corresponde à distância, expressa em mm, percorrida pelo cubo retrorrefletor móvel e  $S$  corresponde à diferença entre os dois feixes que incidem sobre a cabeça do laser, expresso em  $\mu\text{m}$ , que apresenta o valor de  $S= 1,2 \text{ mm}$  [34].

A figura seguinte ilustra uma representação da diferença entre os dois feixes que incidem no laser interferométrico.

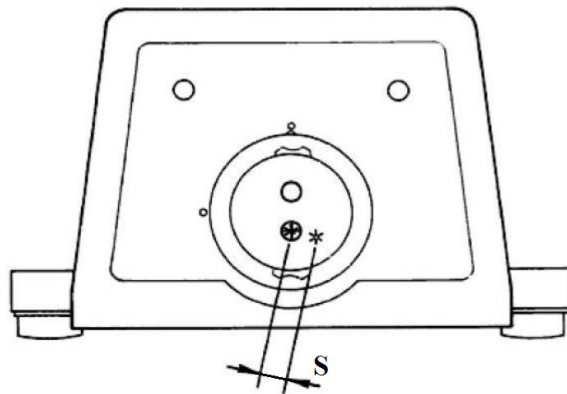


Figura 6.1 – Representação do erro do coseno. Figura adaptada de [25]

### 6.1.1.4 Conclusão

A contribuição da componente da incerteza que depende de  $L$  é expressa pela Equação 6.9 [34].

$$u_L = \sqrt{u_{ar}^2 + u_{\lambda}^2 + u_{cos}^2} \quad \text{Equação 6.9}$$

## 6.1.2 Contribuição para a Incerteza-Padrão de Componentes com Independência do Valor Nominal $L$

### 6.1.2.1 Resolução do Laser Interferométrico HP

A unidade de controlo do sistema laser interferométrico HP representa um equipamento de leitura digital com resolução de leitura de 10 nm, pelo que a incerteza-padrão associada apresenta o valor seguinte [34]:

$$u_{res_{HP}} = \frac{1 \times 10^{-5} \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 2,9 \times 10^{-3} \mu\text{m}$$

### 6.1.2.2 Tipo A para o HP

A incerteza associada à repetibilidade,  $u_{A_{HP}}$ , é correspondente ao valor máximo do desvio padrão obtido para cada indicação e para um número de medições igual a cinco [34].

### 6.1.2.3 Erro Geométrico

O dispositivo desenvolvido que suporta o cubo retrorrefletor do sistema interferométrico pode, ao longo do percurso efetuado, sofrer um desvio angular perpendicular ao eixo de deslocamento, retitude vertical. O desvio angular máximo,  $\theta$ , é dado por  $1,36 \times 10^{-5}$  radianos [34].

$$u_{geo} = h \cdot \theta \quad \text{Equação 6.10}$$

Onde  $h$  representa a distância entre os feixes de cada um dos sistemas interferométricos, e apresenta o valor de  $h=2$  mm [34].

Como o erro é dado pela Equação 6.10, obtêm-se o valor do erro introduzido [34]:

$$u_{geo} = 2 \cdot 1,36 \times 10^{-5} = 0,028 \mu\text{m}$$

### 6.1.2.4 Reprodutibilidade

É realizado o cálculo do desvio-padrão dos valores obtidos em cada modo de funcionamento, e.g, Tipo A,  $u_{Tipo A}$  [34].

### 6.1.2.5 Conclusão

Por último, a contribuição da componente da incerteza independente do valor nominal  $L$  é dada pela Equação 6.11 [34].

$$u_A = \sqrt{u_{res\_HP}^2 + u_{A\_HP}^2 + u_{geo}^2 + u_{Tipo A}^2} \quad \text{Equação 6.11}$$

### 6.1.3 Incerteza-Padrão

A incerteza-padrão associada à medição é dada pela Equação 6.12, onde  $L$  é expresso em mm [34].

$$u = u_A + u_L \cdot L \text{ (}\mu\text{m)} \quad \text{Equação 6.12}$$

### 6.1.4 Incerteza Expandida de Medição

Esta incerteza é dada pela Equação 6.13 [34].

$$U = k \cdot u \text{ (}\mu\text{m)} \quad \text{Equação 6.13}$$

Onde  $u$  representa a incerteza-padrão e  $k$  o fator de expansão. De notar que a incerteza expandida de medição é avaliada de acordo com o “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração, IPQ, 2ª ed, Dezembro 2005” [34].

Pela aplicação da fórmula de Welch-Satterthwaite, Equação 2.20, é determinado o número de graus de liberdade efetivos e consequentemente o fator de expansão  $k$  [34].

## 6.2 Ensaios Realizados

Para os ensaios realizados foram utilizados como sistemas de referência para a comparação em distância os seguintes equipamentos: Sistema Laser Interferométrico HP 5528A; Banco SIP com 12 m; Barómetro Druck DPI 141; Termohigrómetro Fluke 1620A. Para obter pormenores sobre cada um destes elementos consultar o subcapítulo 5.2, *Equipamentos Utilizados*.

O instrumento de medição utilizado para o estudo foi o laser interferométrico *Spindler & Hoyer*, modelo ZLI 150, que é constituído por uma unidade de laser com sensores de condições ambientais ( $p$  (mbar),  $t$  (°C),  $HR$  (%)) associados.

Tratou-se da comparação da indicação do interferómetro sob estudo, com a indicação dada pelo interferómetro HP de referência. Utilizou-se em simultâneo a equação de Edlen, Equação 5.2, para cálculo do fator de compensação a utilizar para que se possa comparar as indicações.

Foram realizados os ensaios apenas no Modo A, que corresponde à utilização da compensação automática do laser interferométrico em estudo. Os Modos B e C não são apresentados,

devido ao *software* associado ao laser em estudo não permitir a introdução dos valores de todos os parâmetros das condições ambientais.

Foram realizados na totalidade 12 ensaios: seis com sistema automatizado desenvolvido, e seis com o sistema manual, onde o deslocamento do dispositivo desenvolvido foi efetuado manualmente. De notar que em todos os ensaios efetuados foi utilizado o dispositivo, desenvolvido através deste trabalho, para a translação do cubo retrorefletor móvel.

Pela extensão dos valores adquiridos e das tabelas processadas apenas se vai apresentar os dados correspondentes aos valores finais obtidos através dos seis ensaios efetuados para cada variante, modo manual e modo automatizado. Naturalmente que os resultados finais apresentados têm em conta todos os dados adquiridos respetivos à totalidade dos ensaios efetuados, doze.

Para consulta de como é efetuada aquisição e tratamento de dados de cada ensaio efetuado consultar o Anexo C.

### • Sistema Manual

Para o caso onde o deslocamento do dispositivo era feito manualmente foram realizados seis ensaios de calibração. A tabela seguinte descreve a média das médias referentes à diferença de indicação em distância de 0 a 10 m, com um passo de 1,0 m, com a incerteza de medição expandida associada a cada valor nominal.

**Tabela 6-1 – Resultados finais na variante manual**

Modo de Funcionamento do Laser em Estudo	Valor Nominal (mm)	$d-D$ ( $\mu\text{m}$ )	$U$ ( $\mu\text{m}$ )	Condições Ambientais
Modo A	0	0,2	0,17	$t = (22,20 \pm 0,01) \text{ } ^\circ\text{C}$ $p = (1001,9 \pm 0,05) \text{ mbar}$ $hr = (74,70 \pm 10) \%$
	1000	1,1	0,33	
	2000	2,0	1,81	
	3000	3,1	1,16	
	4000	4,4	1,27	
	5000	5,4	1,67	
	6000	6,4	1,54	
	7000	7,4	1,34	
	8000	9,0	1,84	
	9000	10,0	1,85	
	10000	10,8	2,15	

$d$  – Distância indicada pelo interferómetro em estudo;  $D$  – Distância indicada pelo interferómetro de referência

O gráfico seguinte ilustra a dispersão relativa à diferença da indicação da distância ( $d-D$ ) entre os interferómetros laser para os ensaios manuais efetuados.

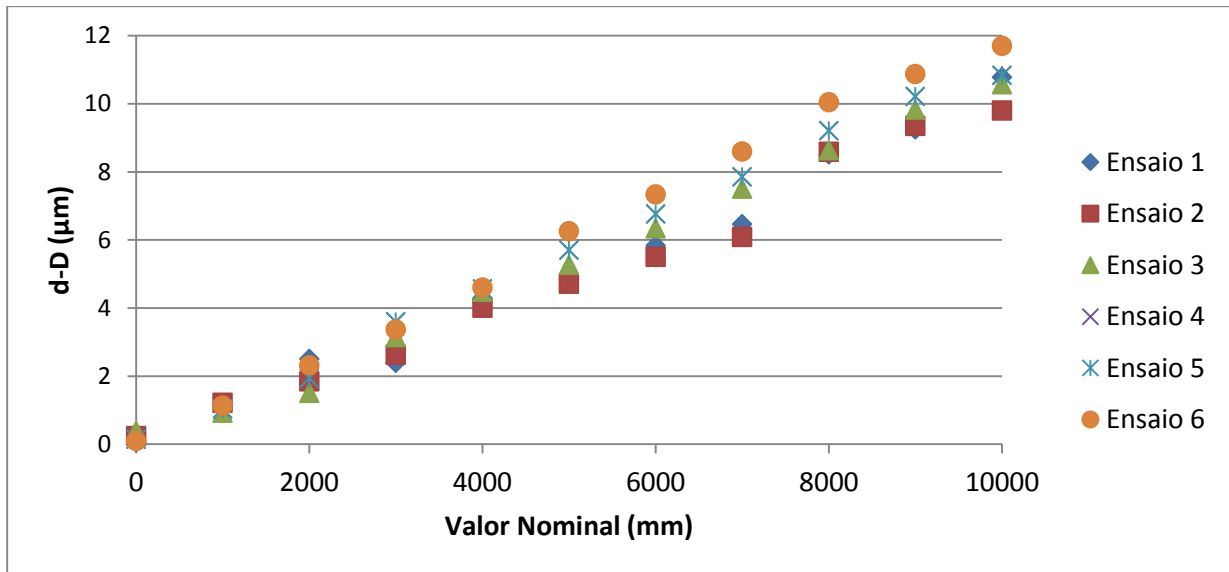


Figura 6.2 – Dispersão  $d-D$  dos ensaios manuais efetuados

### • Sistema Automatizado

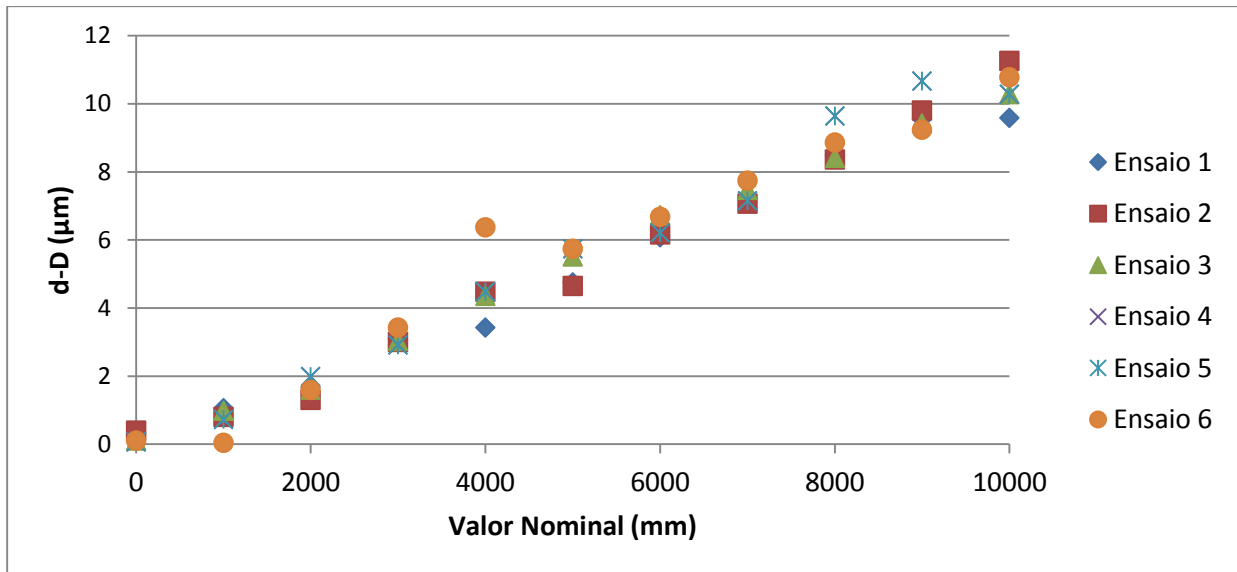
Para o caso onde o deslocamento do dispositivo era automatizado foram realizados seis ensaios de calibração, onde a tabela seguinte descreve a diferença de indicação em distância de 0 a 10 m, com um passo de 1,0 m.

Tabela 6-2 – Resultados finais na variante automatizada

Modo de Funcionamento do Laser em Estudo	Valor Nominal	$d-D$ ( $\mu\text{m}$ )	$U$ ( $\mu\text{m}$ )	Condições Ambientais
Modo A	0	0,2	0,13	$t = (22,40 \pm 0,01) \text{ } ^\circ\text{C}$ $p = (1000,8 \pm 0,05) \text{ mbar}$ $hr = (75,70 \pm 10) \%$
	1000	0,8	0,30	
	2000	1,3	1,84	
	3000	3,2	1,17	
	4000	4,7	1,29	
	5000	5,4	1,69	
	6000	6,6	1,55	
	7000	7,5	1,34	
	8000	8,9	1,86	
	9000	9,8	1,86	
10000	10,4	2,17		

$d$  – Distância indicada pelo interferômetro em estudo;  $D$  – Distância indicada pelo interferômetro de referência

O gráfico seguinte ilustra a dispersão relativa à diferença da indicação da distância ( $d-D$ ) entre os interferômetros laser para os ensaios automatizados efetuados.



**Figura 6.3 – Dispersão dos ensaios automáticos efetuados**

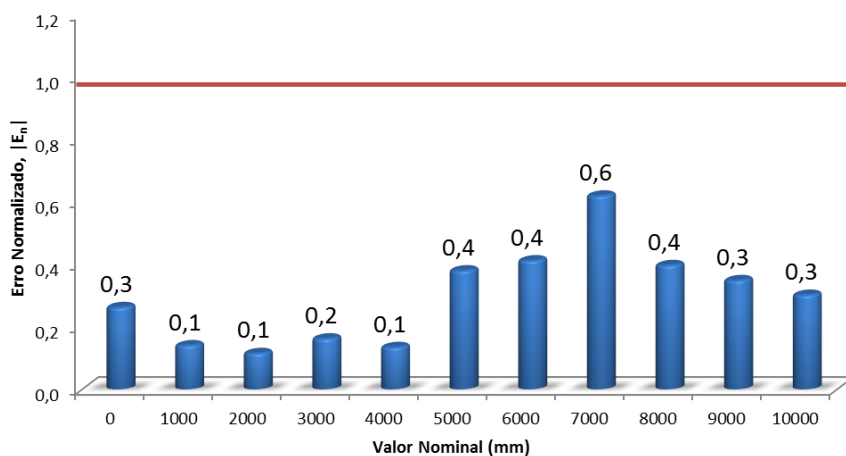
Para consulta de um exemplo de como se processa o cálculo para as tabelas de resultado final consultar Anexo C.

- **Erro normalizado;**

Os resultados associados aos ensaios no banco de 12 m foram analisados (no que respeito à gama nominal até 10 m) utilizando o tratamento estatístico do cálculo do erro normalizado,  $E_n$ .

$$E_n = \frac{V_m - V_{ref}}{\sqrt{U_m^2 + U_{ref}^2}}$$

Onde  $V_m$  e  $U_m$  representam respetivamente os valores medidos e a incerteza expandida apresentada pelo laser interferométrico a ser calibrado.  $V_{ref}$  e  $U_{ref}$  representam respetivamente os valores medidos e a incerteza expandida dos valores de referência, associados ao interferómetro HP.



**Figura 6.4 – Dispersão de Erro Normalizado**

Valores de  $|E_n| \leq 1$  significam um desempenho Satisfatório.

## 7 Conclusões e Discussões de Resultados

Este capítulo pretende apresentar uma síntese das principais conclusões que foram deduzidas ao longo dos vários capítulos presentes nesta dissertação e, principalmente, ao longo das calibrações finais efetuadas. Fundamentalmente, são conclusões que dizem respeito ao dispositivo desenvolvido bem como a sua implementação no processo de calibração de sistemas laser interferométricos em distância até a 10 m.

Ao longo da descrição das conclusões, são efetuadas, também, comparações pontuais com a plataforma móvel inicial, de modo a quantificar, de um modo geral, o grau efetivo de melhoramento permitido pelo dispositivo desenvolvido.

Por último, são descritas algumas sugestões para a realização de implementações futuras com o intuito de melhorar ainda mais o processo de calibração em questão.

### 7.1 Conclusões

O dispositivo desenvolvido foi testado nas condições mais exigentes a que vai estar sujeito na sua vida útil. A variação de calibração até a 10 m é a mais rigorosa, pois requer que os feixes laser sejam alinhados até 10 m, onde, naturalmente, as características do dispositivo desenvolvido são solicitadas ao máximo. Qualquer vibração excessiva provocada pela translação do dispositivo, folga inerente a este ou qualquer outro tipo de oscilação, pode provocar movimento, ainda que subtil, do cubo retrorefletor móvel, que quando estando em causa calibrações a 10 m, leva necessariamente ao desalinhamento imediato dos feixes. De notar que foram efetuadas calibrações onde a translação do dispositivo é feita manualmente bem como com o sistema automatizado, possibilitando uma quantificação efetiva do tempo poupado.

De notar que depois da análise de dados efetuada, os dados tratados foram comparados com o histórico associado a este tipo de calibração. Esta comparação veio a demonstrar que os dados obtidos com as calibrações efetuadas com o dispositivo desenvolvido seguiram a tendência das calibrações efetuadas anteriormente.

Após realizar o alinhamento dos feixes laser, o dispositivo desenvolvido não permitiu que ocorresse qualquer desalinhamento destes, ao contrário da plataforma inicial utilizada. Isto foi constatado pelos ensaios de calibração efetuados e por experiências realizadas com a finalidade de provocar intencionalmente o desalinhamento dos feixes, induzindo acelerações e desacelerações no dispositivo, conseqüentemente no cubo retrorefletor, superiores ao recomendado pelo procedimento de calibração. Esta observação leva a crer que a filosofia relacionada com o facto de a calha de Invar representar uma referência absoluta para translação do dispositivo, constituiu uma favorável decisão.

Não esquecer que o tipo de fixação realizado do dispositivo nas várias direções descritas, o fato de este ser sempre suportado por apenas três pontos de contato em cada plano através de rolamentos, e o sistema auto-ajustante implementado, representaram os fundamentos para a translação correta comprovada durante a calibração, permitindo, em última análise, o não desalinhamento dos feixes.

Como já foi descrito, através de experiências efetuadas antes dos ensaios de calibração finais, os rolamentos introduzidos no dispositivo de facto reduziram os coeficientes de atrito. Esta redução permitiu que se tenha observado, durante as calibrações, uma translação com vibrações desprezáveis, auxiliando, em muito, o não desalinhamento dos feixes durante os processos de calibração

Não foi constatado nenhum problema com a automatização da translação do dispositivo durante as calibrações efetuadas. De facto, esta automatização revelou-se, como esperado, uma grande mais-valia, pois permite que o operador não se tenha de deslocar para realizar o movimento de translação do dispositivo, poupando tempo.

Através dos ensaios manuais efetuados concluiu-se que a translação manual do cubo retrorefletor pode ser efetuada através do dispositivo desenvolvido, não correndo risco de se observar um desalinhamento dos feixes laser. Comprovou-se que os braços basculantes e o sistema auto-ajustante do dispositivo permitem um certo controlo da força não-constante aplicada pelo técnico, suportando-a para que não se traduza numa vibração excessiva do cubo retrorefletor.

Como se pode verificar no capítulo 6, *Resultados*, foram realizados doze ensaios: seis onde o dispositivo foi deslocado manualmente e seis onde a translação do dispositivo foi efetuada através do motor e seus componentes.

Observou-se que, nos seis ensaios onde a translação do dispositivo foi efetuada manualmente, o operador despendeu, em média, 45 minutos para efetuar uma calibração. Por outro lado, nos seis ensaios efetuados com o sistema automatizado, o operador demorou, em média, 30 minutos para efetuar a mesma calibração. Portanto, pode-se concluir que na prática, a implementação de um sistema motorizado que realiza a translação do dispositivo desenvolvido permite uma poupança muito significativa em termos de tempo. Fundamentalmente, com o sistema automatizado desenvolvido através deste trabalho, foi alcançada uma poupança de 33.3% em termos de tempo de cada calibração efetuada. De notar que apenas foram efetuados ensaios com o dispositivo desenvolvido, ainda assim, as calibrações anteriores a este trabalho, realizadas com a plataforma inicial, apresentavam, geralmente, uma duração superior a 45 minutos. Portanto, mesmo sem a automatização da translação, a calibração manual simples efetuada com o dispositivo desenvolvido implementado requer menos tempo.

Fundamentalmente, o tempo relacionado com o deslocamento manual do cubo retrorefletor foi completamente eliminado, permitindo que o operador não necessite sequer de se levantar da secretária, onde se encontram os computadores para aquisição e controlo, para deslocar o dispositivo.

De salientar que, anteriormente a este trabalho, a translação manual do cubo, auxiliada pela plataforma inicial, encarregava outros riscos para além do tempo despendido:

- A força imprimida na plataforma móvel por parte do operador não é constante, podendo ser excessiva em alguns casos, implicando, muitas das vezes, um desalinhar dos feixes, tendo como penalização o operário ter que recomeçar a calibração de novo;
- O contato com os feixes laser de alta potência pode ser nocivo para o operador se este não apresentar cuidados de segurança exigentes, que podem limitar a rapidez da calibração.

Todas estas desvantagens foram eliminadas com o uso do dispositivo desenvolvido através deste trabalho.

Outra característica importante verificada durante as calibrações efetuadas foi o fato do dispositivo desenvolvido puder ser introduzido e retirado da viga SIP sem dificuldades e sem proceder a quaisquer desmontagens de elementos. Confirmou-se que o sistema de “grampos” conseguido através dos braços basculantes aliados às duas molas de tração permitiram a fixação correta do dispositivo durante a calibração, possibilitando a montagem e desmontagem simples sem quaisquer dificuldades. De notar que o sistema constituído pelos braços basculantes, molas e sistema auto-ajustante, permitem que não seja realizada qualquer alteração da integridade física ou até da aparência, tanto da viga SIP como dos pilares que a sustentam, cumprindo assim mais um requisito importante.

O dispositivo desenvolvido demonstrou um funcionamento correto durante as calibrações efetuadas. Não se constatou nenhum problema que interferisse na calibração correta de sistemas interferométricos em distância. Pôde ser confirmado que o dispositivo não necessita de cuidados especiais de manutenção, estando de acordo com os requisitos iniciais e filosofia com que foi projetado.

O peso total do novo dispositivo com todos os seus elementos para a realização da calibração ronda as 2500 g, idêntico à plataforma inicial, cumprindo assim mais um requisito inicial.

Devido à translação suave verificada durante a calibração, não foi necessário, como esperado, a aplicação de qualquer tipo lubrificante, nem no dispositivo nem nas superfícies da viga SIP, contribuindo para um ambiente limpo no LCO e para uma poupança de tempo e custos.

A implementação do dispositivo desenvolvido na calibração de sistemas laser interferométricos em distância foi um sucesso. Trata-se de um dispositivo mais simples de usar e acima de tudo mais eficiente do que a plataforma móvel inicial, permitindo que o operador poupe um tempo considerável neste tipo de calibrações, provocando, ainda, uma diminuição nos custos em cada calibração efetuada, o que é sempre favorável, tendo em conta a conjuntura atual do País. De

salientar que este dispositivo já está completamente implementado no LCO para calibrações futuras de sistemas laser interferométricos.

## 7.2 Sugestão para Melhoramentos Futuros

No decorrer deste trabalho foram consideradas algumas ideias para implementações adicionais a efetuar no dispositivo desenvolvido. Estas não foram realizadas devido à falta de tempo e meios, contudo, neste subcapítulo, são discriminadas algumas dessas ideias com o intuito de as implementar futuramente. De notar que o dispositivo foi desenvolvido com a filosofia de que as implementações futuras necessitariam de um suporte para o *hardware* inerente. Com isso em mente foi criada uma plataforma adicional que pode ser acoplada ao dispositivo, permitindo o albergar de componentes adicionais.

Como já foi referido, para dar começo à calibração de sistemas laser interferométricos em distância é necessário realizar o alinhamento dos feixes referentes ao laser a calibrar e ao laser de referência HP. Para o auxílio deste alinhamento, foi usada a plataforma de ajuste micrométrico 37-M da *Newport*, que permite um posicionamento micrométrico do cubo retrorrefletor. Ainda assim, o operador terá que se deslocar em direção ao dispositivo e alinhar os feixes laser manualmente através dos micrómetros ajustáveis que a plataforma 37-M possui. De notar que este elemento permite o desacoplamento dos micrómetros, ilustrados na Figura 4.6, inseridos no chassis da plataforma.

O controlo remoto da plataforma 37-M era ideal para esta calibração, permitindo que o operador não estivesse em contacto com os feixes laser de elevada potência. De notar que grande parte do contacto entre os feixes laser e o operador já foi reduzido com a automatização da translação do cubo retrorrefletor através do presente trabalho.

Se cada um dos três micrómetros manuais que a plataforma possui fossem substituídos por atuadores automatizados, o operador não necessitaria de se deslocar para efetuar o alinhamento dos feixes. O atuador *NanoPZA12* da *Newport*, ilustrado na Figura 7.1, seria o mais indicado para uma implementação futura na plataforma 37-M. Trata-se de um atuador com uma sensibilidade de movimento de 30 nm, que suporta cargas duas vezes superiores ao micrómetro *standard* que plataforma apresenta de origem [38].

Após o alinhamento dos feixes, a calibração tratada neste trabalho demora, geralmente, mais do que um dia a ser realizada, onde naturalmente é necessário proceder ao desligar dos equipamentos envolvidos, no final do dia, retomando no dia seguinte. Isto poderia revelar-se um problema grave, porém este atuador não permite a perda de posição definida remotamente pelo operador aquando da remoção da alimentação, dando resposta a esta questão [38].

Alumínio é o material que constitui todo o chassis do dispositivo *NanoPZA12*, apresentando assim um incremento de peso individual de apenas 130 g, mantendo peso total em valores similares ao da plataforma móvel original, requisito inicial do projeto. De notar que este atuador apresenta uma extremidade semiesférica não rotativa evitando assim o seu desgaste prematuro [38].

O controlo remoto destes atuadores seria efetuado pelo controlador *PZC200* da *Newport*, o ilustrado na Figura 7.1. Este permite um controlo total da velocidade de avanço do atuador, apresentando um *design* ergonómico e fácil de usar, podendo ser conectado através de porta USB [39].

A figura seguinte ilustra um atuador Nano PZA12 com o respetivo controlador PZC200 associado.



**Figura 7.1 - Atuador *Nano PZA12* e controlador *PZC200* da *Newport***

A organização do controlo dos três atuadores seria efetuada através da *PZC-SB Switchbox* da *Newport*, permitindo um controlo total até oito atuadores com apenas um controlador *PZC200*, eliminando assim a necessidade de o operador ter que possuir três dispositivos de controlo para três atuadores [40].

A figura seguinte ilustra a *Switchbox* da *Newport* que permite o controlo de vários atuadores através de apenas um controlador.



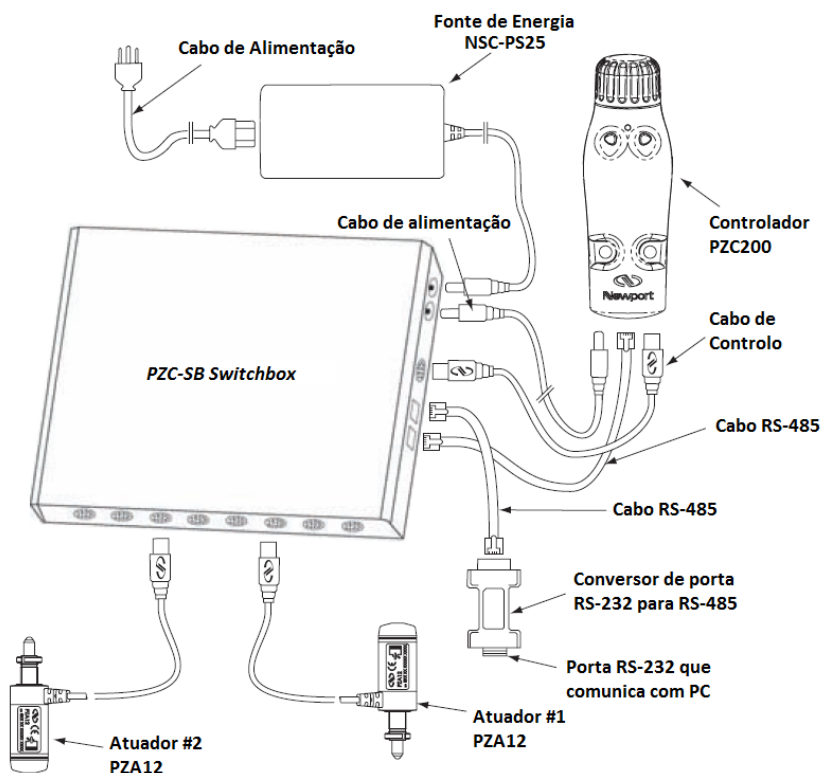
**Figura 7.2 - *PZC-SB Switchbox* que permite o controlo de vários atuadores com um só controlador**

O tipo de ligações a efetuar entre estes elementos que permite o funcionamento pretendido pode ser consultada na Figura 7.3. De notar que a *PZC-SB Switchbox* seria acoplada ao próprio

dispositivo desenvolvido, eliminando a necessidade do uso de alguns cabos de ligação com comprimentos consideráveis.

Para completar o sistema automatizado que permitiria o alinhamento remoto dos feixes laser, era necessário a introdução de uma câmara que transmitisse uma imagem em tempo real da localização da incidência do feixe laser. Assim o operador poderia ter uma noção concreta da incidência dos feixes de modo a decidir qual atuador deve de acionar para permitir que os feixes laser incidam nas portas de entrada de cada um dos sistemas interferométricos, desta forma alinhando-os.

A figura seguinte ilustra de como deve de ser efetuada a montagem dos equipamentos, de modo a controlar vários atuadores com apenas um controlador PZC200.



**Figura 7.3 – Diagrama das conexões para o controle de vários atuadores com um controlador apenas através da *Switchbox* e com interface do computador. Figura adaptada de [41]**

## Bibliografia

- [1] Instituto Português da Qualidade, “Brochura Departamento de Metrologia.” Governo de Portugal.
- [2] F. Saraiva, R. Dias, e S. Gentil, “Calibração de Sistemas Laser Interferométricos em Distância no Laboratório de Comprimento,” *Inst. Port. Qual.*, p. 7, 2006.
- [3] IPQ, “IPQ - Instituto Português da Qualidade.” [Online]. Disponível: [www.ipq.pt](http://www.ipq.pt). [Acedido: 15-Jun-2014].
- [4] JCGM 100, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1.<sup>a</sup> Ed. 2008.
- [5] BIPM, “Introduction,” *BIPM - What is metrology?*, 2004. [Online]. Disponível: <http://www.bipm.org/en/convention/wmd/2004/introduction.html>. [Acedido: 15-Jun-2014].
- [6] P. Howarth e F. Redgrave, *Metrology - in Short*, 3.<sup>a</sup> Edição. EURAMET, 2008.
- [7] P. Guedes, *Metrologia Industrial*. Lisboa, Portugal: Lidel - edições técnicas, lda., 2011.
- [8] Inmetro, “Metrologia Científica.” [Online]. Disponível: <http://inmetro.gov.br/metcientifica/>. [Acedido: 15-Jun-2014].
- [9] C. Sousa, “Cadernos Técnicos Carlos Sousa.” CATIM, 2008.
- [10] Inmetro, “Metrologia Legal.” [Online]. Disponível: <http://inmetro.gov.br/metlegal/>. [Acedido: 15-Jun-2014].
- [11] BIPM, *The International System of Units (S.I.)*, 8.<sup>a</sup> Edição. 1, Boulevard Ney, 75018 Paris: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.
- [12] “BIPM: Bureau International des Poids et Mesures.” [Online]. Disponível: <http://www.bipm.org/>. [Acedido: 20-Jul-2014].
- [13] “Decreto de Lei n.º 140/2004, 1.<sup>a</sup> Série -A, N.º 134, 8 de Junho de 2004.” .
- [14] Governo de Portugal, “Relatório Anual de Atividades 2012 - IPQ.” Ministério da Economia e do Emprego, 2012.
- [15] Governo de Portugal, “Relatório Anual de Atividades 2011 - IPQ.” Ministério da Economia e do Emprego, 2012.
- [16] “Portaria n.º 23/2013, 1.<sup>a</sup> série, N.º 17, 24 de Janeiro de 2013.” .
- [17] Guia ISO/IEC 99, *Vocabulário Internacional de Metrologia*, 3.<sup>a</sup> Ed. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2012
- [18] *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração - GUM*, 2.<sup>a</sup> Ed. Caparica, 2005.
- [19] P. W. Milonni, *Laser Physics*, 2.<sup>a</sup> Ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2010.
- [20] “Laser Instrument,” *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Disponível: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/330874/laser>. [Acedido: 12-Sep-2014].
- [21] E. Hecht, *Optics*, 4.<sup>a</sup> Ed. Reading, Mass: Addison-Wesley, 2001.
- [22] M. Facão, *Interferómetro de Michelson: princípios e aplicações*. Universidade de Aveiro: Departamento de Física, 1999.
- [23] R. Kneppers, “HP Laser Interferometers.” VAISALA News, 1999.
- [24] “Michelson Interferometer.” [Online]. Disponível: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/michel.html>. [Acedido: 15-Sep-2014].

- [25] Hewlett-Packard Company, “User’s Guide 5528A Laser Measurement System.” Santa Clara, Mar-1992.
- [26] O.R Nascimento, *Efeito de Zeeman*. Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, Laboratório Avançado de Física, 2000.
- [27] J. S. Walker, *Physics*, 4 ed. San Francisco, CA: Addison-Wesley, 2009.
- [28] A. J. Martinho, *Órgãos de Máquinas I*, 3.<sup>a</sup> edição. Monte de Caparica: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [29] R. Budynas e K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 8 ed. Boston: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006.
- [30] Fanamol, “Fanamol Online.” [Online]. Disponível: <http://www.fanamol.pt/loja/>. [Acedido: 04-Sep-2014].
- [31] Polulu, “Pololu - 47:1 Metal Gearmotor 25Dx52L mm HP with 48 CPR Encoder.” [Online]. Disponível: <http://www.pololu.com/product/2274>. [Acedido: 07-Sep-2014].
- [32] Polulu, “Pololu Simple High-Power Motor Controller 18v15 (Fully Assembled).” [Online]. Disponível: <http://www.pololu.com/product/1376>. [Acedido: 07-Sep-2014].
- [33] Polulu, “Pololu USB Software Development Kit.” [Online]. Disponível: <http://www.pololu.com/docs/0J41>. [Acedido: 06-Sep-2014].
- [34] “Procedimento da Comparação da Distância entre Dois Sistemas Interferométricos.” Instituto Português da Qualidade, 2004.
- [35] General Electric - Sensing & Inspection Technologies, “User’s Manual K0023 - Druck DPI 140/141.” General Electric.
- [36] FLuke - Hart Scientific, “User’s Manual - Fluke 1620A ‘DewK.’” Fluke Corporation & Hart Scientific Division, 2006.
- [37] Newport, “Plataforma M-37.” [Online]. Disponível: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-37](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-37). [Acedido: 11-Sep-2014].
- [38] Newport, “Atuador PZA12.” [Online]. Disponível: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=PZA12](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=PZA12). [Acedido: 11-Sep-2014].
- [39] Newport, “Controlador PZC200.” [Online]. Disponível: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=PZC200](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=PZC200). [Acedido: 11-Sep-2014].
- [40] Newport, “Switchbox PZC-SB.” [Online]. Disponível: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=PZC-SB](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=PZC-SB). [Acedido: 11-Sep-2014].
- [41] Newport, “Ultra-High Resolution Actuators.” Newport, Sep-2005.

### **Bibliografia Adicional Consultada**

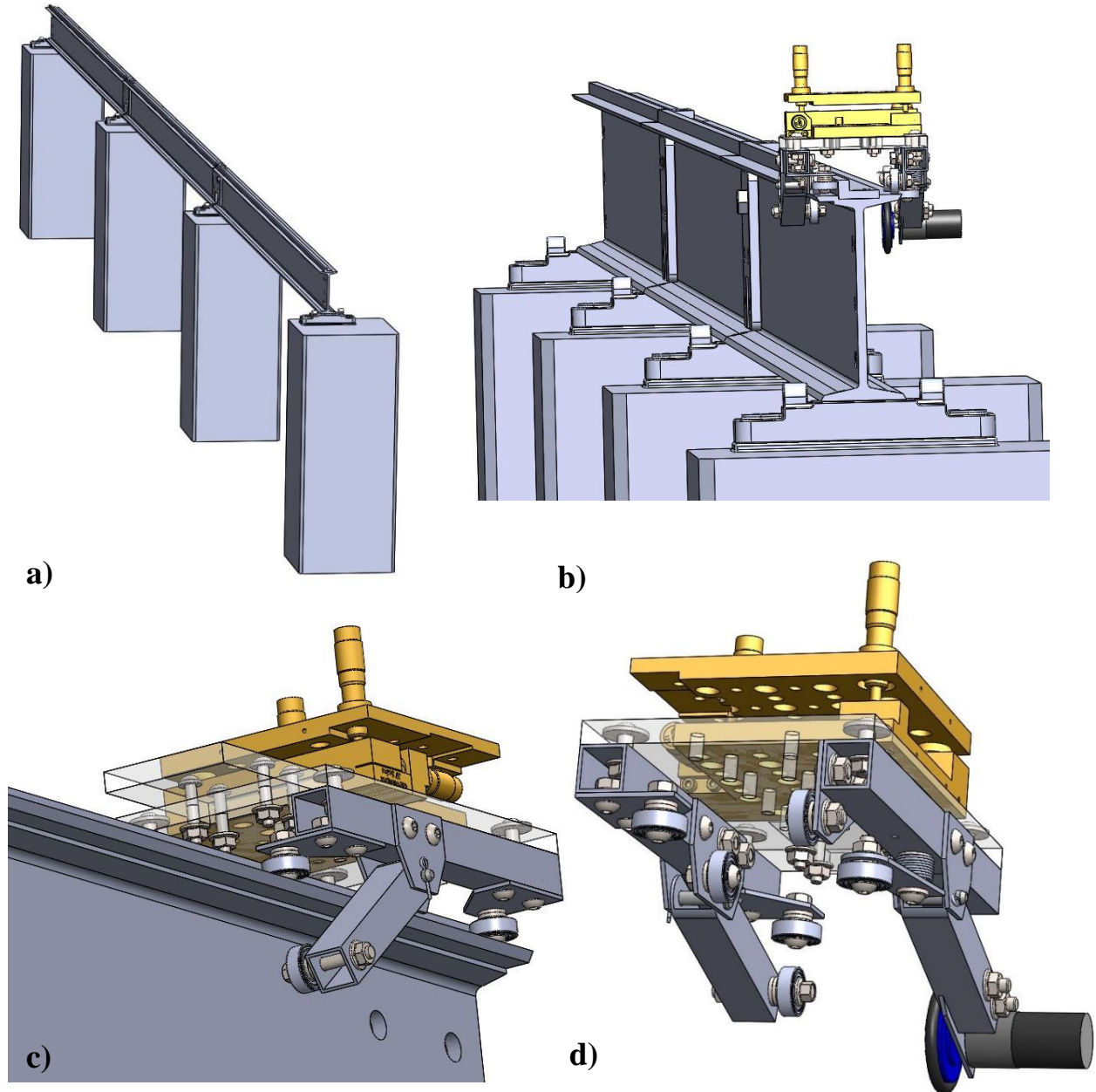
- ISO, “*Clevis Pins With Head – ISO 2341*”, 1986.
- ISO, “*Split Pins – ISO 1234*”, 1997.
- ISO, “*ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes – Tables of Standard Tolerance Classes and Limit Deviations for Holes and Shafts – ISO 286-2*”, 2010.
- Bruel & Kjaer, “*Fixtures for B&K Exciters*”. Copenhagen, Denmark, 1973.
- Bucher and J. L, “*The Metrology Handbook*”, Second Edition. Milwaukee, Wis: Quality Press, 2012.

## **Anexos**



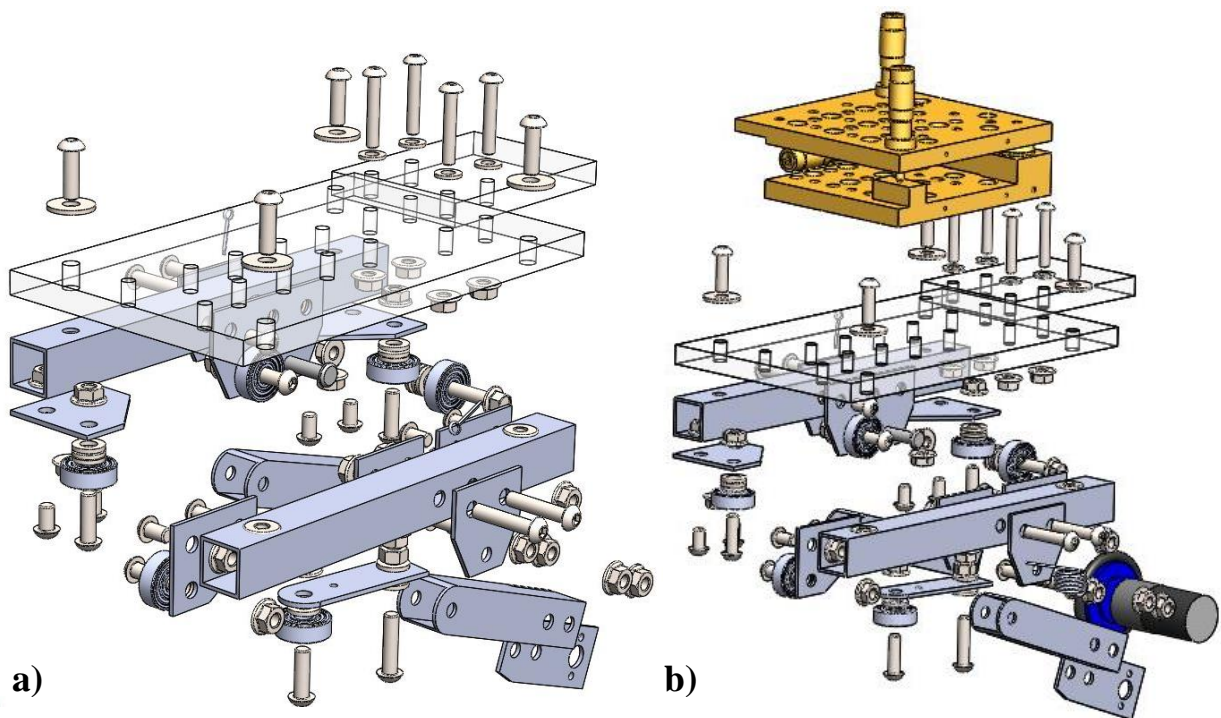
## Anexo A: Imagens do Dispositivo Desenvolvido

A figura seguinte ilustra a modelação que foi efetuada em *SolidWorks* do banco de ensaios SIP e do dispositivo desenvolvido.



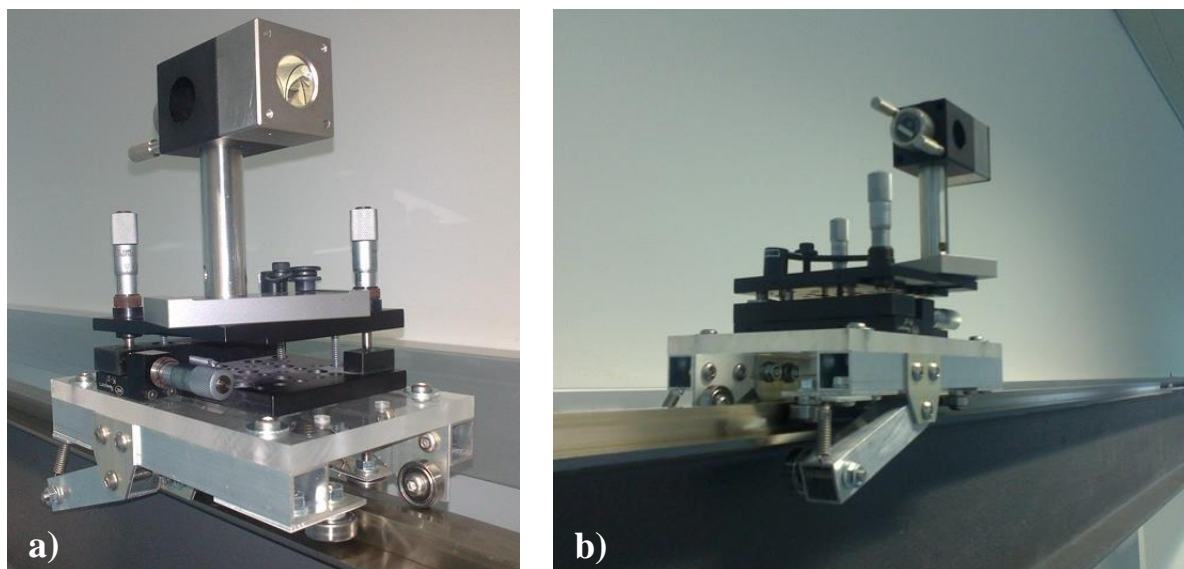
**Figura A 1 – Banco de ensaios SIP e dispositivo: a) Perspetiva; b) Perspetiva com dispositivo; c) Outra perspetiva com dispositivo; d) Pormenor do dispositivo.**

A figura seguinte ilustra uma vista explodida com os elementos do dispositivo e uma vista explodida com o motor e a plataforma regulável utilizada.



**Figura A 2 – Vista explodida: a) Elementos do dispositivo; b) Elementos do dispositivo mais motor e plataforma Newport associada**

A figura seguinte ilustra o dispositivo desenvolvido implementado no processo de calibração efetuado, suportando a plataforma regulável da Newport, elementos associados à fixação e o cubo retrorefletor linear HP.



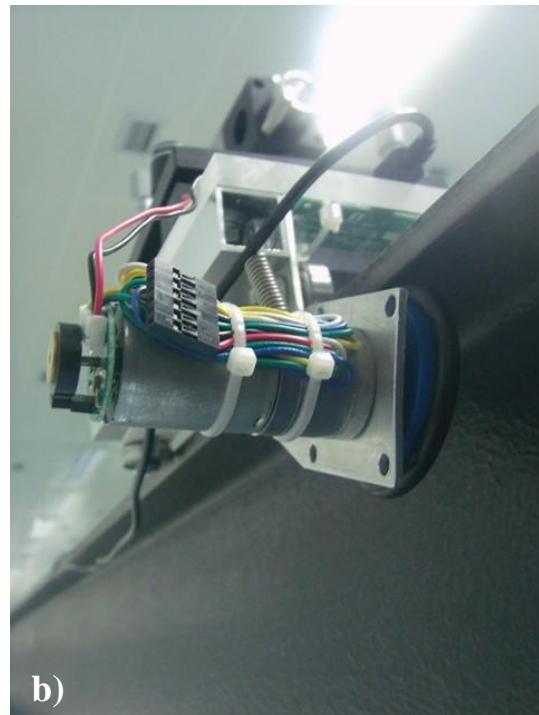
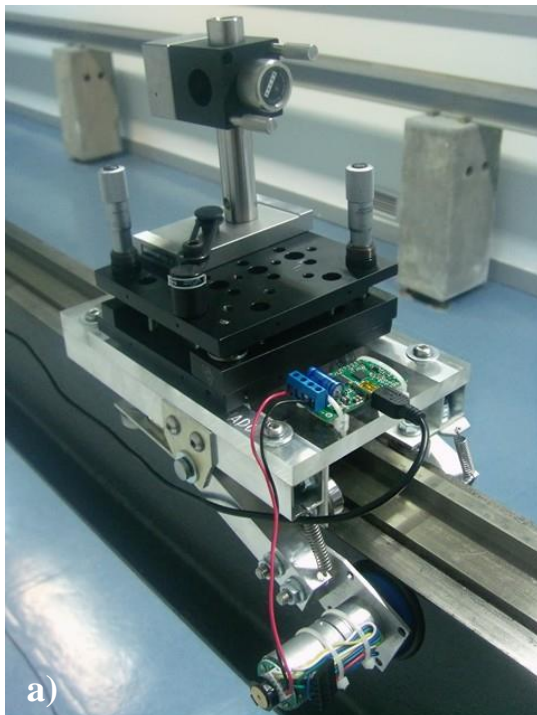
**Figura A 3 – Dispositivo desenvolvido em funcionamento: a) Vista em perspectiva frontal; b) Vista em perspectiva traseira**

A figura seguinte ilustra o alinhamento dos feixes laser efetuado, de modo a proceder à calibração realizada. A placa representada na Figura A 1 b), é utilizada para o auxílio do processo de alinhamento.



**Figura A 4 – Cubo retrorrefletor alinhado com os feixes: a) Vista em perspectiva traseira; b) Vista em perspectiva frontal**

A figura seguinte ilustra a disposição dos componentes que integram o sistema automatizado que permitiu a translação do dispositivo desenvolvido e, conseqüentemente, a translação do cubo retrorrefletor.



**Figura A 5 – Dispositivo de translação com componentes associados à translação automatizada: a) Vista geral; b) Pormenor do motor**



## Anexo B: Tabela de Aplicação Informática para Escolha de Molas

As tabelas seguintes indicam as características das molas *standard* disponíveis para a aquisição, salientando a que foi implementada no dispositivo desenvolvido.

**Tabela B 1 – Características das molas de tração *standard***

Molas <i>Standard</i> de Tração Helicoidais com Arame de Secção Circular									
Modelo	Características						Comprimento Final, $\Delta x+L_0$ (mm)	Decisão	
	Comprimento Total, $L_0$ (mm)	Comprimento de Enrolamento, L (mm)	Diâmetro Exterior, $D_e$ (mm)	Diâmetro do Arame, d (mm)	Força (N)	Deformação, $\Delta x$ (mm)			
S-1246	19,5	9	6,7	1,067	20	2,697183896	22,197	NÃO!	
S-567	27,5	20,5	4,1	0,305	20	984,3757286	1011,876	NÃO!	
S-599	9,5	5	2,5	0,305	20	46,45637014	55,956	NÃO!	
S-1154	11	7	2,2	0,305	20	41,85018461	52,850	NÃO!	
S-566	19,5	13	4,3	0,356	20	323,4260324	342,926	NÃO!	
S-1153	20,5	16,5	2,5	0,356	20	65,94459256	86,445	NÃO!	
S-561	28	23	3	0,356	20	172,3983443	200,398	NÃO!	
S-560	16	11	3	0,406	20	40,35927206	56,359	NÃO!	
S-627	19	12,5	4,3	0,406	20	155,1452839	174,145	NÃO!	
S-1148	25,5	14,5	6,7	0,889	20	11,88181307	37,382	OK!	
S-571	24,5	1805	4,2	0,457	20	11010,99535	11035,495	NÃO!	
S-363	32	19,5	8,5	0,508	20	682,2654318	714,265	NÃO!	
S-565	13,5	7,5	3,8	0,508	20	18,33973574	31,840	NÃO!	
S-1144	15	8	4,1	0,508	20	25,41272878	40,413	NÃO!	
S-1149	24	17	4,4	0,508	20	68,69414883	92,694	NÃO!	
S-1155	17	9,5	4,3	0,508	20	35,50429732	52,504	NÃO!	
S-1157	28	21	4,4	0,559	20	50,55499464	78,555	NÃO!	
S-564	25	18,5	4	0,635	20	15,83176007	40,832	NÃO!	
S-578	24	16,5	4,6	0,635	20	23,10020237	47,100	NÃO!	
S-1138	34	26,5	4,5	0,635	20	34,36344009	68,363	NÃO!	
S-33228	36,5	23	7,5	0,635	20	167,128966	203,629	NÃO!	
S-701	34	16,5	8,8	0,711	20	111,4528911	145,453	NÃO!	
S-703	22	13	5,1	0,711	20	14,02694141	36,027	NÃO!	
S-712	29,5	21,5	4,7	0,711	20	17,41620216	46,916	NÃO!	
S-1140	33	23	5,5	0,711	20	32,23927267	65,239	NÃO!	
S-297	24,5	13	7,2	0,813	20	22,11323416	46,613	NÃO!	
S-1145	31,5	18,5	7,5	0,813	20	36,11468756	67,615	NÃO!	
S-1146	29	19	7	0,889	20	18,10725173	47,107	NÃO!	
S-574	32,5	19,5	7,8	1,067	20	9,979510732	42,480	NÃO!	
S-1246	19,5	9	6,7	1,067	20	2,697183896	22,197	NÃO!	
S-875	29,5	10	10	1,245	20	5,202266377	34,702	NÃO!	
S-1511	33	19	8,5	1,473	20	2,204553381	35,205	NÃO!	
S-550	32,5	10	12,7	2,108	20	0,661990528	33,162	NÃO!	

**Tabela B 2 - Características das molas de torção *standard***

Molas <i>Standard</i> de Torsão Helicoidais com Arame de Secção Circular								
Modelo	Características					Módulo de Elasticidade Longitudinal, L (GPa)	Momento Torsor Gerado, M (N.m)	Decisão
	Comprimento Total, $L_0$ (mm)	Diâmetro Exterior, $D_e$ (mm)	Diâmetro do Arame, d (mm)	Deformação Angular, $\theta$ (°)				
S-1633	5,5	15	1,829	180		193	2,675	NÃO!
S-1615	12	9,6	0,813	180		193	0,032	NÃO!
S-291	17	6,5	0,889	180		193	0,055	NÃO!
S-1614	6,5	15,5	1,651	180		193	1,290	OK!
S-1500	6	25	2,108	180		193	2,870	NÃO!
S-1520	7	22	2,108	180		193	2,831	NÃO!
S-817	6,5	17	2,413	180		193	8,170	NÃO!
S-1863	7,2	27,7	2,413	180		193	4,255	NÃO!
S-1864	9,7	27,7	2,413	180		193	3,158	NÃO!



## Anexo C: Dados de Aquisição

A tabela seguinte corresponde aos dados adquiridos relativos a um ensaio manual efetuado.

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
mm	mm	mbar	°C	%	mm	mm	mbar	°C	%
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0001	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0001	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0003	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0002	1005,31	22,01	73
0	0,0003	1008,90	21,60	73	0	0,0001	1005,31	22,01	73
Média	0,0003	1008,90	21,60	73,00	Média	0,0002	1005,31	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7028	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7028	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7028	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7028	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7027	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7027	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7028	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7027	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7026	1005,33	22,01	73
1000	999,7038	1008,90	21,60	73	1000	999,7027	1005,33	22,01	73
Média	999,7038	1008,90	21,60	73,00	Média	999,7027	1005,33	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2471	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2472	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2472	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2472	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2472	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2473	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2473	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2474	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2474	1005,32	22,02	73
2000	1998,2491	1008,90	21,60	73	2000	1998,2474	1005,32	22,02	73
Média	1998,2491	1008,90	21,60	73,00	Média	1998,2473	1005,32	22,02	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual (Continuação)**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4159	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4157	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4157	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4157	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4156	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4156	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4155	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4151	1005,33	22,01	73
3000	3000,4196	1008,90	21,60	73	3000	3000,4151	1005,33	22,01	73
Média	3000,4196	1008,90	21,60	73,00	Média	3000,4156	1005,33	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0003	0,00	0,00	0,00
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3912	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3912	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3912	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
4000	4000,3959	1008,90	21,60	73	4000	4000,3913	1005,35	22,00	73
Média	4000,3959	1008,90	21,60	73,00	Média	4000,3913	1005,35	22,00	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5603	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5603	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5603	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5603	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5604	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5603	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5604	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5604	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5604	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5605	1005,38	22,01	73
5000	5000,5661	1008,90	21,60	73	5000	5000,5605	1005,38	22,01	73
Média	5000,5661	1008,90	21,60	73,00	Média	5000,5604	1005,38	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7369	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7369	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7370	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7371	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7371	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7371	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7371	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7372	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7373	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7372	1005,40	22,01	73
6000	6000,7438	1009,00	21,60	73	6000	6000,7372	1005,40	22,01	73
Média	6000,7438	1009,00	21,60	73,00	Média	6000,7371	1005,40	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual (Continuação)**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0359	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0359	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0359	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0360	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0361	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0361	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0361	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0362	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0362	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0362	1005,43	22,01	73
7000	7002,0438	1009,00	21,60	73	7000	7002,0363	1005,43	22,01	73
Média	7002,0438	1009,00	21,60	73,00	Média	7002,0361	1005,43	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6057	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6057	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6057	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6058	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6058	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6058	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6058	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6059	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6060	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6060	1005,45	22,00	73
8000	8000,6150	1009,00	21,60	73	8000	8000,6061	1005,45	22,00	73
Média	8000,6150	1009,00	21,60	73,00	Média	8000,6059	1005,45	22,00	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8815	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8813	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8813	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8813	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8812	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8811	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8811	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8811	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8811	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8811	1005,46	22,00	73
9000	8999,8915	1009,00	21,60	73	9000	8999,8810	1005,46	22,00	73
Média	8999,8915	1009,00	21,60	73,00	Média	8999,8812	1005,46	22,00	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5062	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5063	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5063	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5063	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5066	1005,47	22,01	73
10000	9709,5169	1009,00	21,60	73	10000	9709,5065	1005,47	22,01	73
Média	9709,5169	1009,00	21,60	73,00	Média	9709,5064	1005,47	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual (Continuação)**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5066	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5064	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5065	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5066	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5065	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5065	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5066	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5067	1005,46	22,01	73
10000	9709,5177	1009,00	21,60	73	10000	9709,5066	1005,46	22,01	73
Média	9709,5177	1009,00	21,60	73,00	Média	9709,5065	1005,46	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4780	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4780	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4779	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4780	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4781	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4781	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4781	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4782	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4781	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4782	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4781	1005,45	22,01	73
9000	9000,4882	1009,00	21,60	73	9000	9000,4782	1005,45	22,01	73
Média	9000,4882	1009,00	21,60	73,00	Média	9000,4781	1005,45	22,01	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7474	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7473	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7473	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7472	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7473	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7472	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7472	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7472	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7472	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7471	1005,45	22,02	73
8000	8000,7565	1009,00	21,60	73	8000	8000,7471	1005,45	22,02	73
Média	8000,7565	1009,00	21,60	73,00	Média	8000,7472	1005,45	22,02	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6751	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6753	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6753	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6752	1005,44	22,03	73
7000	6997,6832	1009,00	21,60	73	7000	6997,6753	1005,44	22,03	73
Média	6997,6832	1009,00	21,60	73,00	Média	6997,6752	1005,44	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual (Continuação)**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6558	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6558	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6558	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6560	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6560	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6562	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6562	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6563	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6564	1005,44	22,03	73
6000	6000,6629	1009,00	21,60	73	6000	6000,6563	1005,44	22,03	73
Média	6000,6629	1009,00	21,60	73,00	Média	6000,6561	1005,44	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0002	0,00	0,00	0,00
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8291	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8290	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8291	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8290	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8291	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8292	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8291	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8292	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8292	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8292	1005,45	22,03	73
5000	4999,8348	1009,00	21,60	73	5000	4999,8292	1005,45	22,03	73
Média	4999,8348	1009,00	21,60	73,00	Média	4999,8291	1005,45	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3746	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3746	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3744	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
4000	4000,3790	1009,00	21,70	73	4000	4000,3745	1005,47	22,03	73
Média	4000,3790	1009,00	21,70	73,00	Média	4000,3745	1005,47	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2424	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2423	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2423	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2425	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2424	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2425	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2425	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2425	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2426	1005,49	22,03	73
3000	3000,2456	1009,00	21,70	73	3000	3000,2425	1005,49	22,03	73
Média	3000,2456	1009,00	21,70	73,00	Média	3000,2425	1005,49	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

**Tabela C 1 – Dados adquiridos relativos a um ensaio manual (Continuação)**

Dados Adquiridos									
Valor nominal	Indicação SPINDLER (d)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade	Valor nominal	Indicação HP (D)	Pressão	Temperatura do ar	Humidade
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2957	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2956	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2957	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2957	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2957	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2958	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2958	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2959	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2958	1005,52	22,03	73
2000	1998,2978	1009,00	21,70	73	2000	1998,2959	1005,52	22,03	73
Média	1998,2978	1009,00	21,70	73,00	Média	1998,2958	1005,52	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1920	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1920	1005,54	22,03	73
1000	1000,1931	1009,00	21,70	73	1000	1000,1921	1005,54	22,03	73
Média	1000,1931	1009,00	21,70	73,00	Média	1000,1921	1005,54	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1305	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1305	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1306	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1306	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1307	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1306	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1307	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1306	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1307	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1307	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1308	1005,56	22,03	73
0	0,1308	1009,00	21,70	73	0	0,1307	1005,56	22,03	73
Média	0,1308	1009,00	21,70	73,00	Média	0,1306	1005,56	22,03	73,00
Des.Padrão	0,0000	0,00	0,00	0,00	Des.Padrão	0,0001	0,00	0,00	0,00

A tabela seguinte demonstra os resultados obtidos para um ensaio manual.

**Tabela C 2 – Resultados obtidos de um ensaio manual**

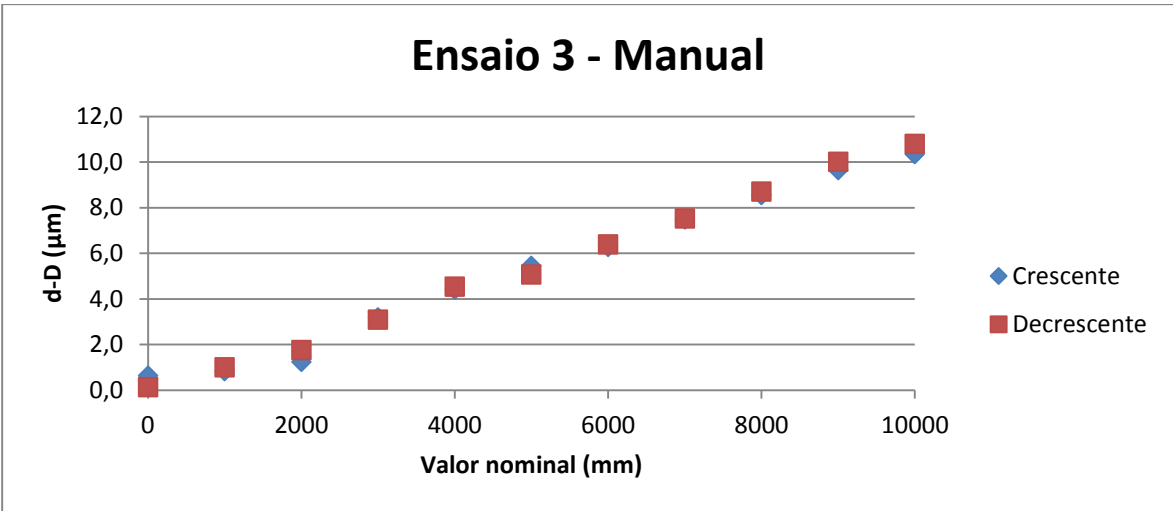
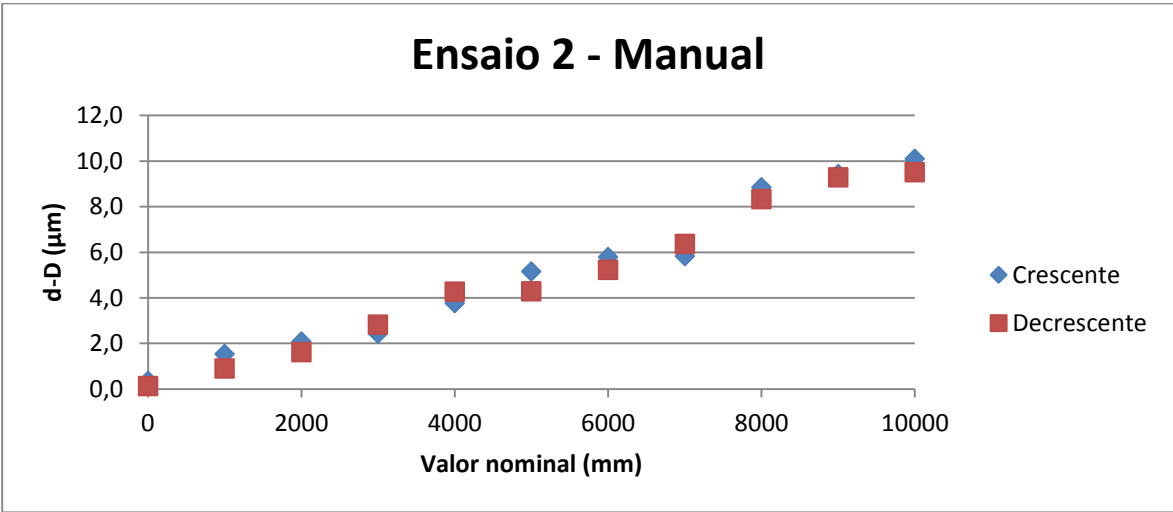
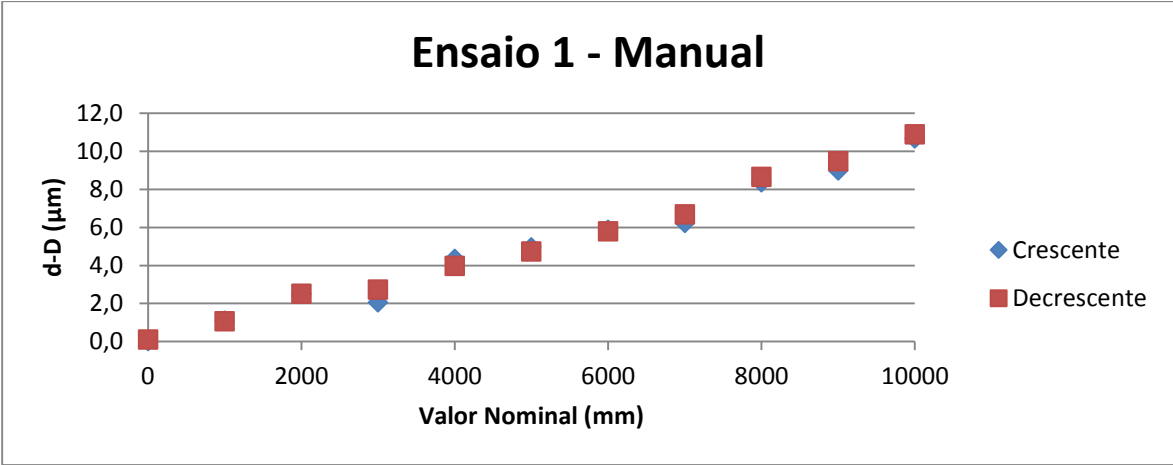
Ensaio 1				
Valor nominal (mm)	Indicação Spindler ( <i>d</i> ) (mm)	Indicação HP ( <i>D</i> ) (mm)	<i>d-D</i> (mm)	<i>d-D</i> (µm)
0	0,0003	0,0002	0,0001	0,1
1000	999,7038	999,7027	0,0011	1,1
2000	1998,2491	1998,2473	0,0018	1,8
3000	3000,4196	3000,4156	0,0040	4,0
4000	4000,3959	4000,3913	0,0046	4,6
5000	5000,5661	5000,5604	0,0057	5,7
6000	6000,7438	6000,7371	0,0067	6,7
7000	7002,0438	7002,0361	0,0077	7,7
8000	8000,6150	8000,6059	0,0091	9,1
9000	8999,8915	8999,8812	0,0103	10,3
10000	9709,5169	9709,5064	0,0105	10,5
10000	9709,5177	9709,5065	0,0112	11,2
9000	9000,4882	9000,4781	0,0101	10,1
8000	8000,7565	8000,7472	0,0093	9,3
7000	6997,6832	6997,6752	0,0080	8,0
6000	6000,6629	6000,6561	0,0068	6,8
5000	4999,8348	4999,8291	0,0057	5,7
4000	4000,3790	4000,3745	0,0045	4,5
3000	3000,2456	3000,2425	0,0032	3,2
2000	1998,2978	1998,2958	0,0020	2,0
1000	1000,1931	1000,1921	0,0010	1,0
0	0,1308	0,1306	0,0002	0,2

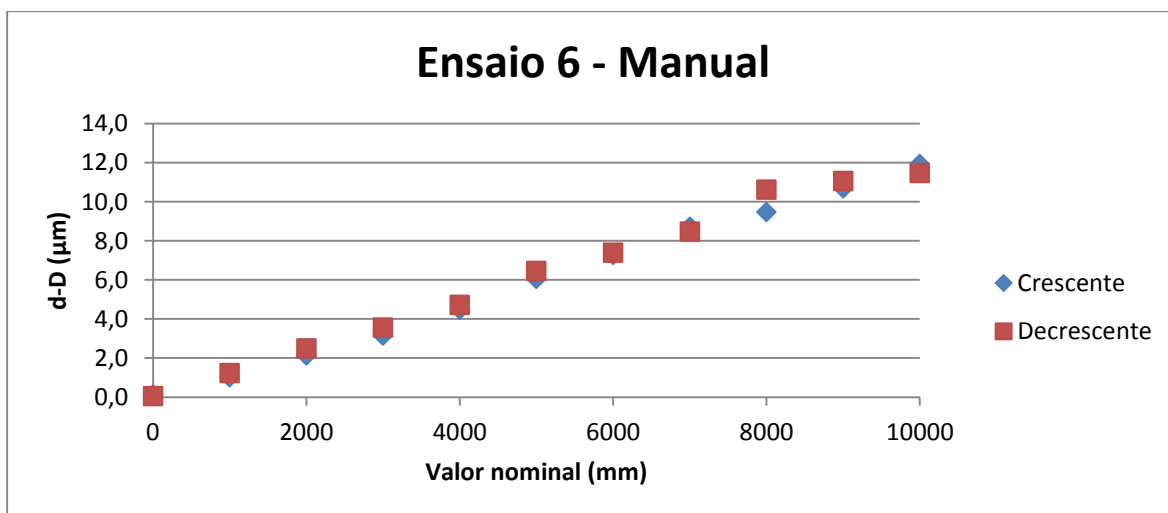
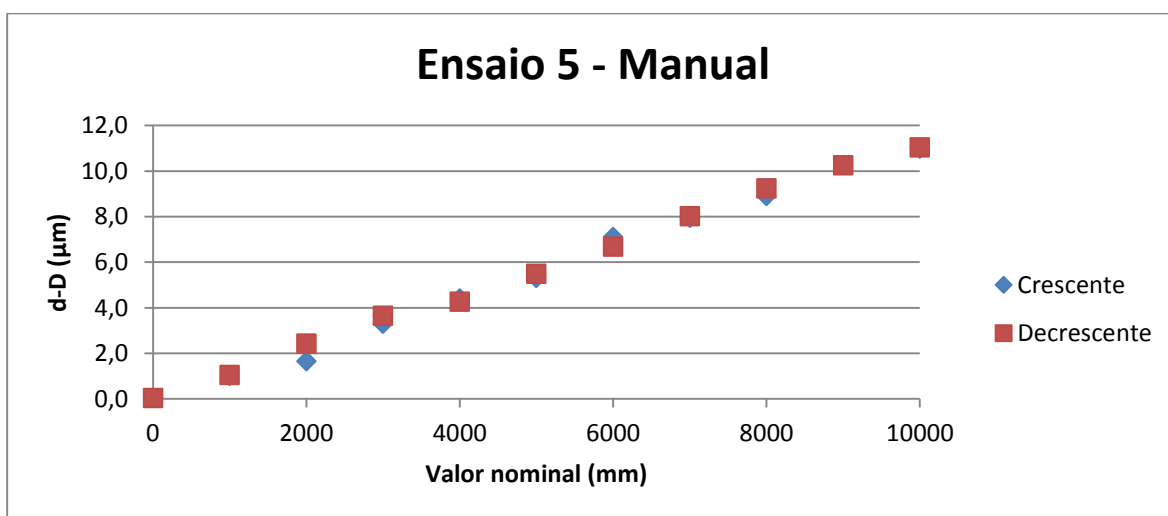
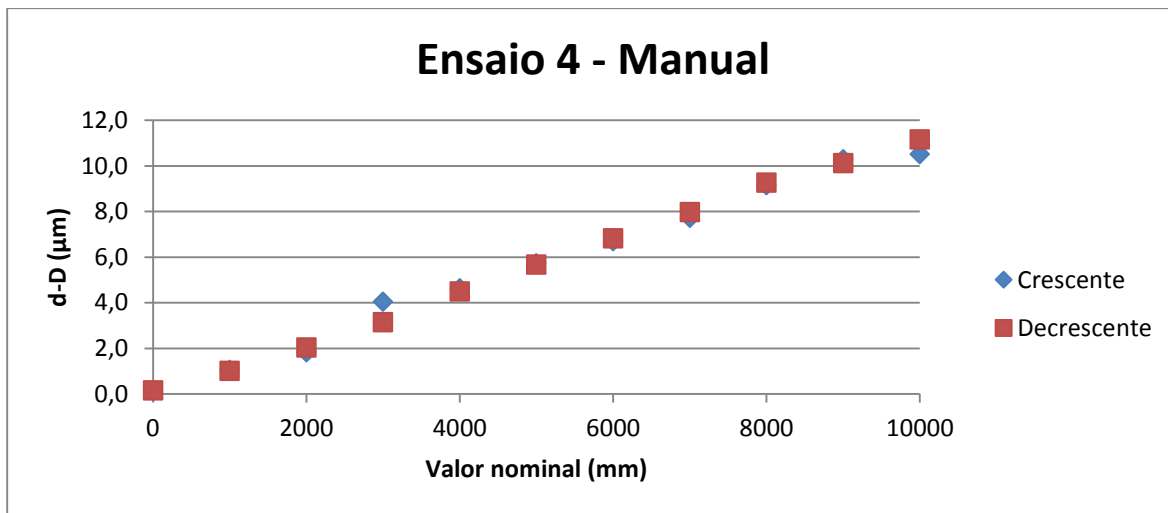
A tabela seguinte indica os valores médios obtidos de um ensaio manual.

**Tabela C 3 – Valores médios obtidos de um ensaio manual**

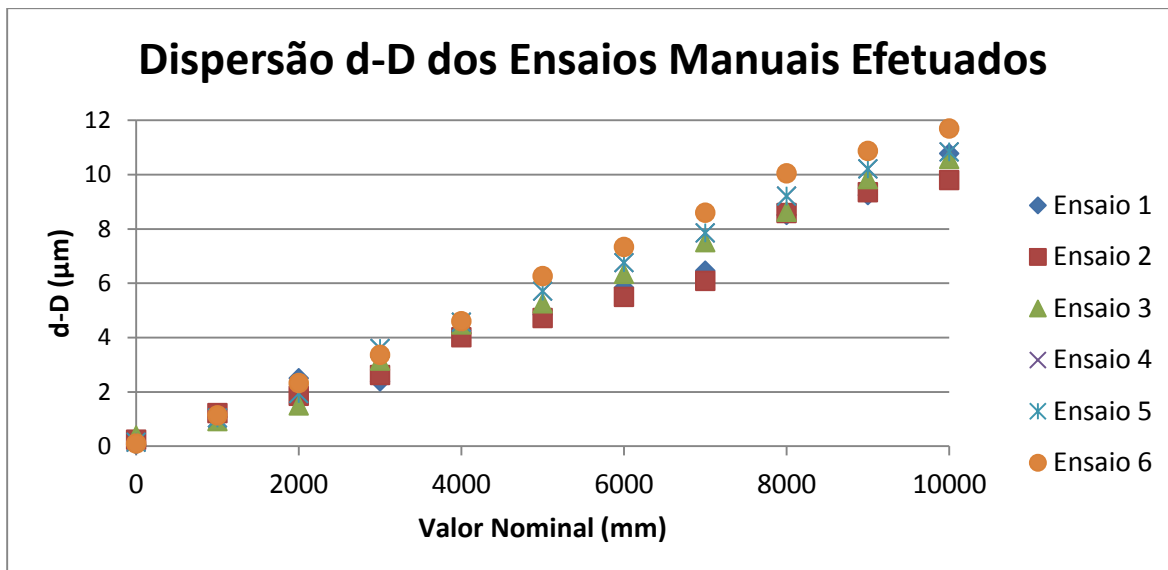
Valor nominal	Indicação Spindler ( <i>d</i> ) (mm)	Indicação HP ( <i>D</i> ) (mm)	<i>d-D</i> (mm)	<i>d-D</i> (µm)
0	0,06555	0,06541	0,00014	0,1
1000	999,94845	999,94741	0,00104	1,0
2000	1998,27345	1998,27152	0,00194	1,9
3000	3000,33260	3000,32901	0,00360	3,6
4000	4000,38745	4000,38289	0,00456	4,6
5000	5000,20045	5000,19475	0,00570	5,7
6000	6000,70335	6000,69659	0,00676	6,8
7000	6999,86350	6999,85565	0,00786	7,9
8000	8000,68575	8000,67654	0,00921	9,2
9000	9000,18985	9000,17964	0,01021	10,2
10000	9709,51730	9709,50646	0,01084	10,8

As figuras seguintes representam gráficos relativos aos seis ensaios manuais realizados mais o gráfico final. É ilustrada a dispersão dos resultados obtidos nos ensaios manuais referente à diferença de indicação (*d-D*), no caso de medições efetuadas de 0 a 10 m (crescente), e de 10 a 0 m (decrecente).





O gráfico seguinte ilustra as dispersões combinadas de todos os ensaios manuais efetuados.



A tabela seguinte representa o estudo de repetibilidade (HP) e reprodutibilidade (Spindler), aplicados a um ensaio.

**Tabela C 4 – Reprodutibilidade, HP**

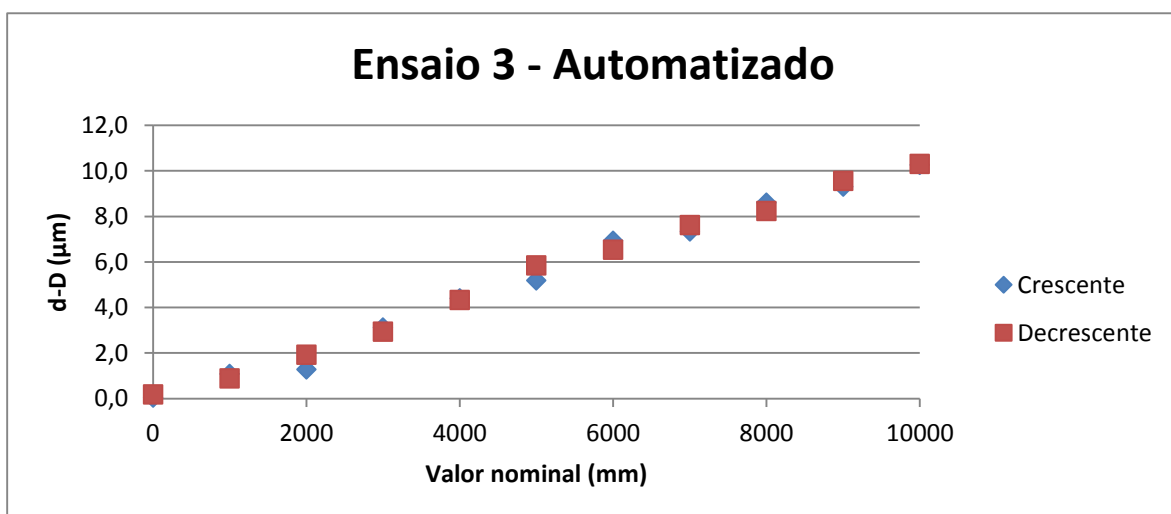
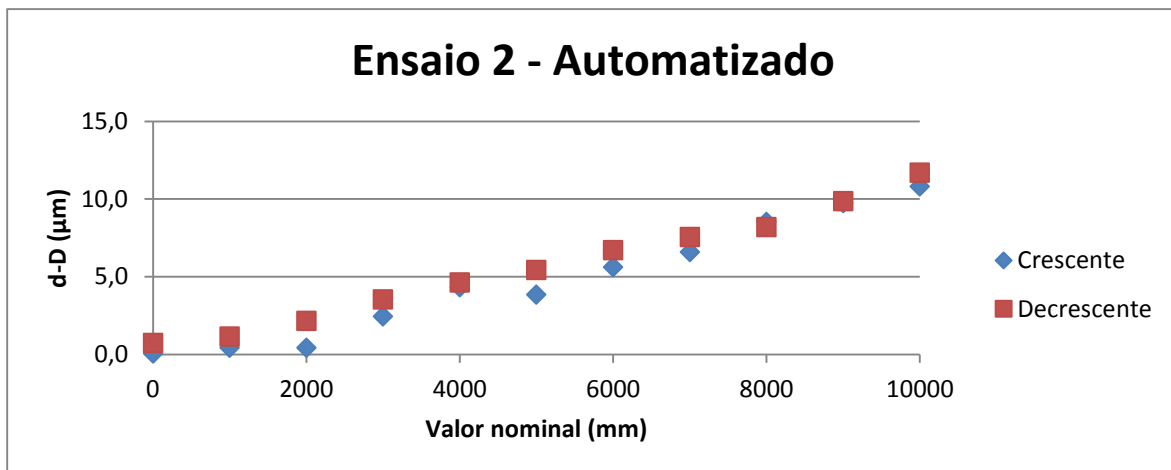
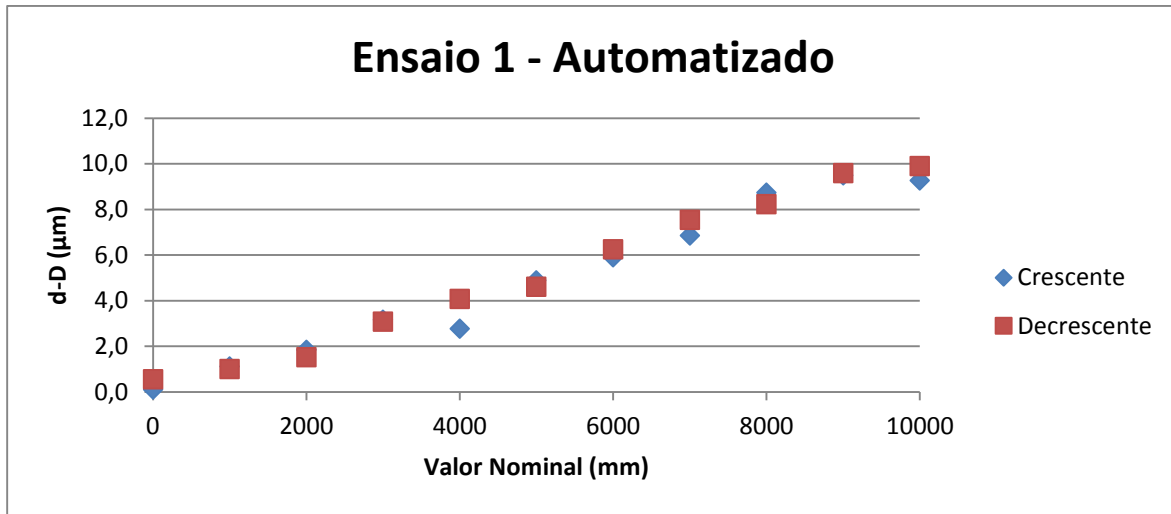
Distância nominal	Reprodutibilidade (µm)
0	0,05
1000	0,05
2000	0,73
3000	0,33
4000	0,30
5000	0,41
6000	0,27
7000	0,07
8000	0,26
9000	0,17
10000	0,24
<b>Valor máximo Reprodutibilidade (ensaioSpindler) (µm)</b>	<b>0,73</b>
	<b>0,05</b>

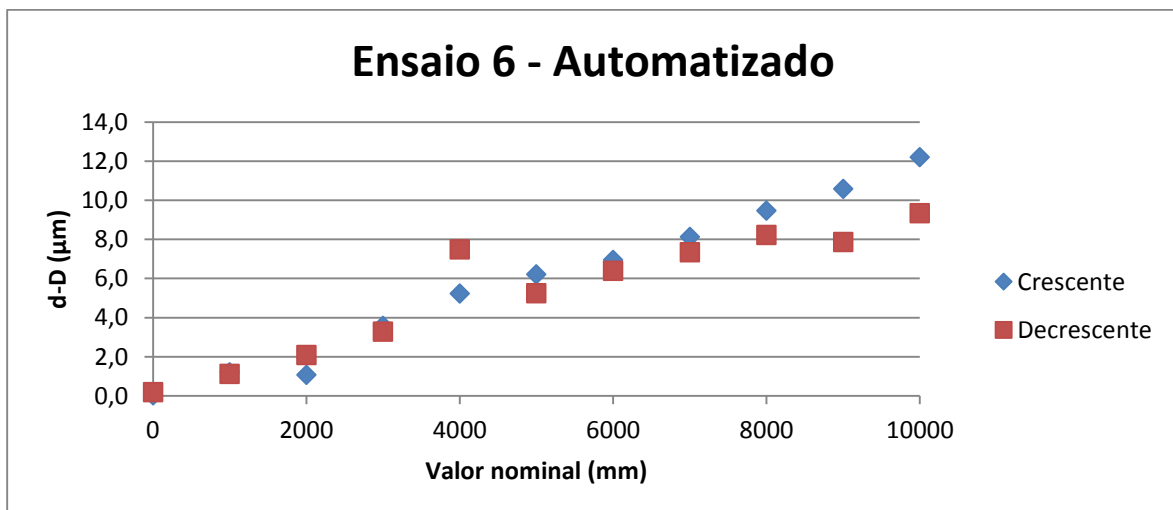
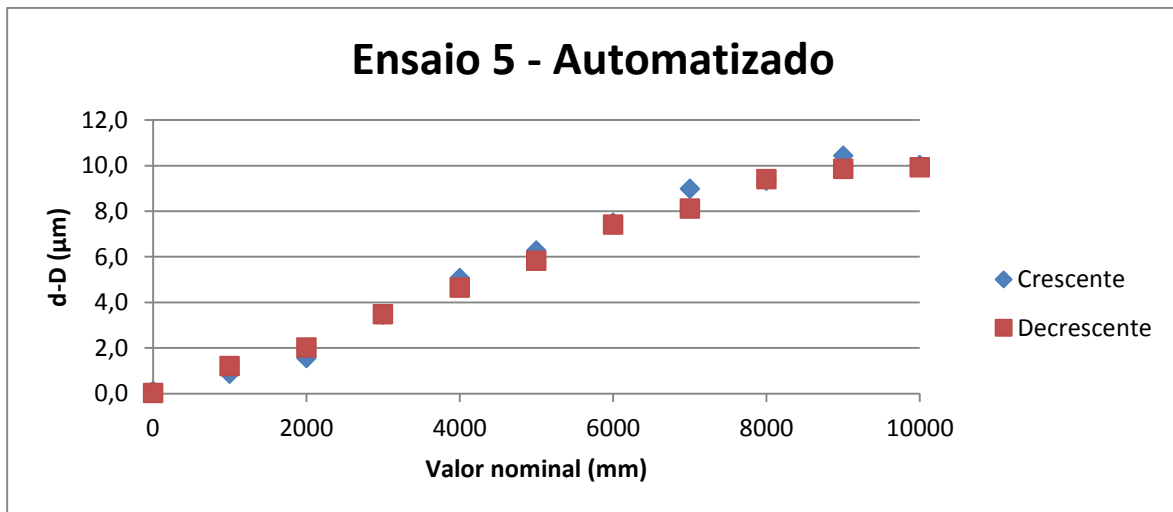
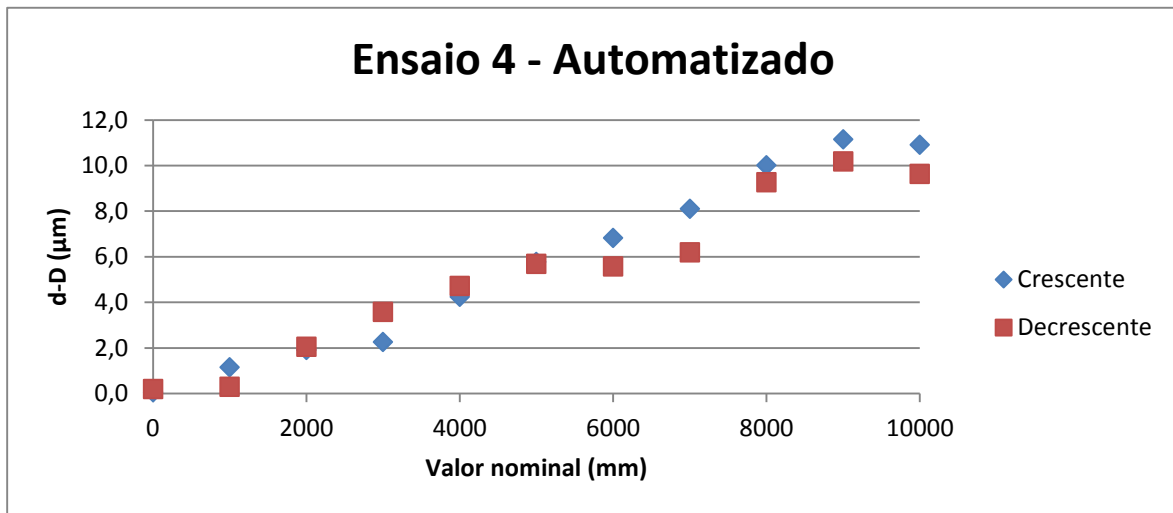
**Tabela C 5 – Repetibilidade, Spindler**

Distância nominal	Repetibilidade (µm)
0	0,06
1000	0,05
2000	0,16
3000	0,10
4000	0,07
5000	0,20
6000	0,04
7000	0,03
8000	0,06
9000	0,05
10000	0,04
<b>Valor máximo Repetibilidade (HP) (µm)</b>	<b>0,20</b>
	<b>0,03</b>

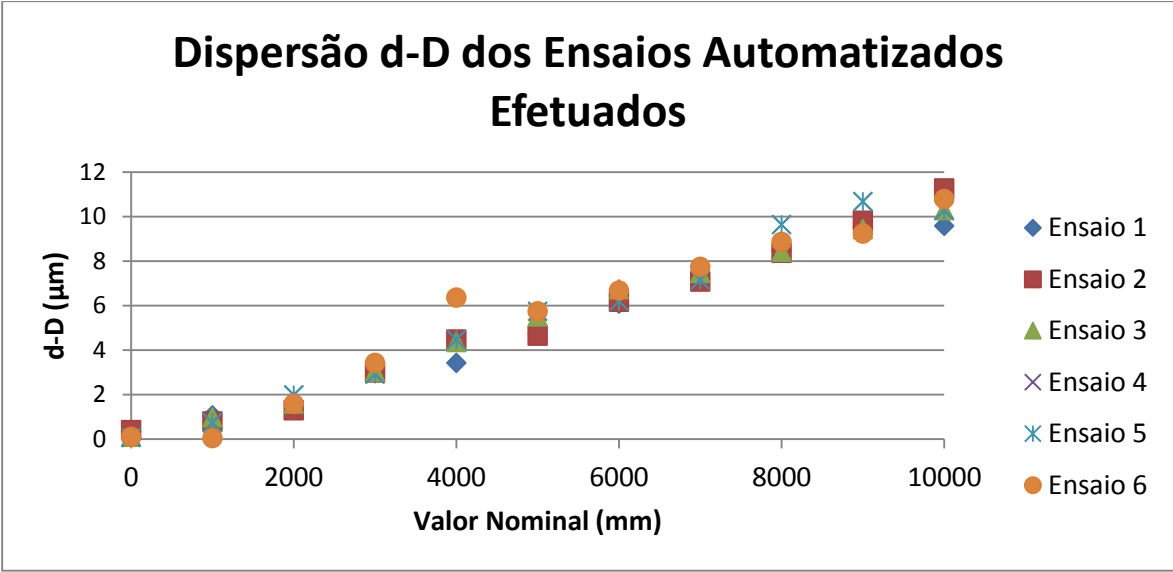
O resultado dos ensaios manuais é dado no subcapítulo 6.2, *Ensaio Realizados*.

Nos gráficos seguintes são ilustradas as dispersões dos resultados obtidos nos ensaios automatizados referentes à diferença de indicação ( $d-D$ ), no caso de medições efetuadas de 0 a 10 m (crescente), e de 10 a 0 m (decrescente).





O gráfico seguinte ilustra as dispersões combinadas de todos os ensaios automatizados efetuados.



O resultado dos ensaios automatizados é dado no subcapítulo 6.2, *Ensaio Realizados*.



## Anexo D: Balanço de Incertezas de Medição

Tabela D 1 – Balanço de incertezas para o modo manual

Balanço de Incertezas				
Componente da incerteza padrão, $u(x_i)$	Distribuição	Incerteza-padrão $u(x_i)$	$ c_{x_i}  \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_{x_i}  \times u(x_i)$ [ $\mu\text{m}$ ] para $L$ [mm]
<b>Índice de Refração do ar, <math>u_{ar}</math></b>				
Equação Edlen $u_{eq}$	Normal	$1 \times 10^{-8}$	$L$	$1,0 \times 10^{-5} L$
Temperatura ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) $u_{tar}$	Normal	0,003	$9,5 \times 10^{-7} L/^{\circ}\text{C}$	$2,85 \times 10^{-6} L$
Pressão ar (Pa) $u_{par}$	Normal	2	$2,68 \times 10^{-9} L/\text{Pa}$	$5,36 \times 10^{-6} L$
Humidade ar (%) $u_{har}$	Normal	0,15	$1,27 \times 10^{-9} L/\%$	$1,27 \times 10^{-6} L$
<b>Interferómetro HP</b>				
Comprimento de onda $u_{\lambda}$	Normal	$2,35 \times 10^6$	$1,34 \times 10^{-21} L$	$3,14 \times 10^{-9} L$
Resolução $u_{res\_HP}$	Rectangular	$\left(\frac{1 \times 10^{-5}}{\sqrt{12}}\right)$	1	$2,89 \times 10^{-3}$
Tipo A $u_{A\_HP}$	Normal	0,06	1	--- <sup>(4)</sup>
Erro geométrico $u_{geo}$	Normal	$2,72 \times 10^{-6}$	1	$2,72 \times 10^{-2}$
Erro do coseno $u_{cos}$	Normal	$8,00 \times 10^{-8}$	$L$	$8,00 \times 10^{-5}$
<b>Ensaio</b>				
Reprodutibilidade $u_{Tipo A}$	Normal	---	1	--- <sup>(5)</sup>
<b>Incerteza-padrão combinada:</b> $u = u_A + u_L L$ $\mu\text{m}$ (com $L$ em mm)				
<b>Incerteza expandida:</b> $U = k \times u$ $\mu\text{m}$ (com $L$ em mm) , com $k = 2$				

A tabela seguinte apresenta o cálculo da incerteza-padrão combinada,  $u$ , e incerteza de medição expandida,  $U$ , para cada valor nominal referente aos ensaios na variante manual.

Tabela D 2 – Resultados da incerteza-padrão combinada e incerteza de medição expandida

Valor nominal $L$ (mm)	Tipo A ( $\mu\text{m}$ )	$u_L$ ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$u_A$ ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$U$ ( $\mu\text{m}$ )
0	0,05	$8,09 \times 10^{-5}$	0,08	0,17
1000	0,05	$8,09 \times 10^{-5}$	0,08	0,33
2000	0,73	$8,09 \times 10^{-5}$	0,74	1,81
3000	0,33	$8,09 \times 10^{-5}$	0,33	1,16
4000	0,30	$8,09 \times 10^{-5}$	0,31	1,27
5000	0,41	$8,09 \times 10^{-5}$	0,42	1,67
6000	0,27	$8,09 \times 10^{-5}$	0,27	1,54
7000	0,07	$8,09 \times 10^{-5}$	0,10	1,34
8000	0,26	$8,09 \times 10^{-5}$	0,27	1,84
9000	0,17	$8,09 \times 10^{-5}$	0,19	1,85
10000	0,24	$8,09 \times 10^{-5}$	0,25	2,15

<sup>(4)</sup> Resultante do tratamento de dados do ensaio

<sup>(5)</sup> Resultante do tratamento de dados do ensaio

Tabela D 3 – Balanço de Incertezas para o modo automatizado

Balanço de Incertezas				
Componente da incerteza padrão, $u(x_i)$	Distribuição	Incerteza-padrão $u(x_i)$	$ c_{x_i}  \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_{x_i}  \times u(x_i)$ [ $\mu\text{m}$ ] para $L$ [mm]
<b>Índice de Refração do ar, <math>u_{ar}</math></b>				
Equação Edlen $u_{eq}$	Normal	$1 \times 10^{-8}$	$L$	$1,0 \times 10^{-5} L$
Temperatura ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) $u_{tar}$	Normal	0,003	$9,5 \times 10^{-7} L/^{\circ}\text{C}$	$2,85 \times 10^{-6} L$
Pressão ar (Pa) $u_{par}$	Normal	2	$2,68 \times 10^{-9} L/\text{Pa}$	$5,36 \times 10^{-6} L$
Humidade ar (%) $u_{har}$	Normal	0,15	$8,49 \times 10^{-9} L/\%$	$1,27 \times 10^{-6} L$
<b>Interferómetro HP</b>				
Comprimento de onda $u_{\lambda}$	Normal	$2,35 \times 10^6$	$1,34 \times 10^{-21} L$	$3,14 \times 10^{-9} L$
Resolução $u_{res\_HP}$	Rectangular	$\left(\frac{1 \times 10^{-5}}{\sqrt{12}}\right)$	1	$2,89 \times 10^{-3}$
Tipo A $u_{A\_HP}$	Normal	0,03	1	--- <sup>(6)</sup>
Erro geométrico $u_{geo}$	Normal	$2,72 \times 10^{-6}$	1	$2,72 \times 10^{-2}$
Erro do coseno $u_{cos}$	Normal	$8,00 \times 10^{-8}$	$L$	$8,00 \times 10^{-5}$
<b>Ensaio</b>				
Reprodutibilidade $u_{Tipo A}$	Normal	---	1	--- <sup>(7)</sup>
<b>Incerteza-padrão combinada:</b> $u = u_A + u_L L \quad \mu\text{m}$ (com $L$ em mm)				
<b>Incerteza expandida:</b> $U = k \times u \quad \mu\text{m}$ (com $L$ em mm) , com $k = 2$				

A tabela seguinte apresenta o cálculo da incerteza-padrão combinada,  $u$ , e incerteza de medição expandida,  $U$ , para cada valor nominal referente aos ensaios na variante de sistema automatizado.

Tabela D 4 – Resultados da incerteza-padrão combinada e incerteza de medição expandida

Valor nominal $L$ (mm)	Tipo A ( $\mu\text{m}$ )	$u_L$ ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$u_A$ ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$U$ ( $\mu\text{m}$ )
0	0,05	$8,09 \times 10^{-5}$	0,07	0,13
1000	0,05	$8,09 \times 10^{-5}$	0,07	0,30
2000	0,73	$8,09 \times 10^{-5}$	0,73	1,84
3000	0,33	$8,09 \times 10^{-5}$	0,33	1,17
4000	0,30	$8,09 \times 10^{-5}$	0,30	1,29
5000	0,41	$8,09 \times 10^{-5}$	0,42	1,69
6000	0,27	$8,09 \times 10^{-5}$	0,27	1,55
7000	0,07	$8,09 \times 10^{-5}$	0,08	1,34
8000	0,26	$8,09 \times 10^{-5}$	0,26	1,86
9000	0,17	$8,09 \times 10^{-5}$	0,18	1,86
10000	0,24	$8,09 \times 10^{-5}$	0,25	2,17

<sup>(6)</sup> Resultante do tratamento de dados do ensaio

<sup>(7)</sup> Resultante do tratamento de dados do ensaio