



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CARATERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM ALONGÂMETRO

Trabalho realizado para o Departamento de Barragens
de Betão do LNEC, I.P.

Lisboa • junho de 2016

I&D CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 180/2016 – **CIC/NQM**

Título

CARATERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM ALONGÂMETRO

Autoria

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Luís Filipe Lages Martins

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Qualidade Metrológica

Álvaro Silva Ribeiro

Investigador Auxiliar, Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 180/2016

Proc. 0904/1302/12469

CARATERIZAÇÃO METROLÓGICA DE UM ALONGÂMETRO

Resumo

Este relatório descreve as atividades experimentais associadas à caracterização metrológica de um alongâmetro utilizado no contexto da observação de barragens de betão, que permitiram avaliar o seu nível de exatidão mediante quantificação da sua incerteza de medição instrumental e integração numa cadeia de rastreabilidade dimensional do Sistema Internacional (SI) de Unidades.

Palavras-chave: Alongâmetro / Caracterização metrológica / Barragem de betão

METROLOGICAL CHARACTERIZATION OF A DIAL STRAIN GAUGE

Abstract

This report describes the experimental activities related to the metrological characterization of a dial strain gauge applied in the concrete dam observation context, which allowed evaluating its accuracy level through the quantification of its instrumental measurement uncertainty and integration in a dimensional traceability chain of the International System (SI) of Units.

Keywords: Dial strain gauge / Metrological characterization / Concrete dam

Índice

1	Introdução	1
2	Medição dimensional com alongâmetro.....	2
	2.1 Descrição do método e instrumento de medição	2
	2.2 Modelos matemáticos	4
3	Caraterização metrológica do alongâmetro	7
	3.1 Descrição dos ensaios metrológicos realizados.....	7
	3.2 Apresentação e discussão de resultados	10
	3.2.1 Comparador analógico.....	10
	3.2.2 Alongâmetro.....	11
	3.2.3 Barra de referência	13
	3.2.4 Cércea com pontas cónicas	13
	3.2.5 Incerteza de medição instrumental	14
4	Conclusões.....	15
	Referências Bibliográficas	17
	Anexos.....	19
	ANEXO I	21
	ANEXO II	35
	ANEXO III	39

Índice de figuras

Figura 2.1 – Base triangular para medição dimensional com alongâmetro.....	2
Figura 2.2 – Alongâmetro e respetivos componentes e acessórios.	3
Figura 2.3 – Movimento de abertura-fecho na base triangular.	4
Figura 2.4 – Deslizamento na base triangular.....	5
Figura 3.1 – Montagem experimental para calibração do alongâmetro.....	8
Figura 3.2 – Variação da distância entre ponteiras de contacto do alongâmetro.....	9
Figura 3.3 – Pormenor da medição dimensional da ponteira de contacto do alongâmetro	9
Figura 3.4 – Desvios de calibração do comparador analógico.	10
Figura 3.5 – Desvios de linearidade do alongâmetro.....	12

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Valores lidos no comparador e distâncias medidas entre ponteiras de contacto do alongâmetro	11
Quadro 3.2 – Valores lidos no comparador e deslocamentos entre ponteiras de contacto do alongâmetro	11
Quadro 3.3 – Regressão linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento entre ponteiras de contacto.....	12
Quadro 3.4 – Distância medida entre concavidades da barra de referência	13
Quadro 3.5 – Distância medida entre pontas cónicas da cércea.....	13
Quadro 3.6 – Balanço de incerteza de medição instrumental do alongâmetro	14

1 | Introdução

No âmbito da atividade de investigação e desenvolvimento tecnológico desempenhada pelo LNEC no domínio da Engenharia Civil, compete ao Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica a realização de estudos de avaliação da qualidade metrológica de instrumentos e cadeias de medição utilizados nesse domínio em áreas diversificadas como Barragens de Betão, Geotecnia, Hidráulica, Estruturas, Edifícios, Materiais e Transportes. Este tipo de estudos metrológicos visa um julgamento fundamentado e rigoroso da adequação técnica da instrumentação e cadeias de medição aos contextos de medição em que se encontram inseridos, nomeadamente, em ambiente laboratorial, industrial ou de obra, garantindo a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI) de Unidades e quantificando a respetiva incerteza de medição instrumental. Deste modo, assegura-se um acréscimo de confiança nas medições realizadas que, em regra, possuem relevantes consequências sociais e económicas.

O presente relatório é elaborado com intuito de dar resposta à solicitação do Núcleo de Observação do Departamento de Barragens de Betão do LNEC, visando a caracterização metrológica dum alongâmetro. Este instrumento possibilita a medição do movimento de abertura-fecho e deslizamento em descontinuidades estruturais, por exemplo, fissuras ou juntas associadas a blocos de barragens de betão e a maciços rochosos, contribuindo para a melhoria do conhecimento do seu comportamento estrutural e conseqüente avaliação de segurança e deteção atempada de dano.

A caracterização metrológica efetuada é suportada num conjunto de ensaios experimentais realizados pela Unidade operativa de Metrologia Aplicada do LNEC – Ensaios e Metrologia (UMA/LNEC-EM). Esta unidade laboratorial do NQM está acreditada desde 1995, sendo-lhe periodicamente reconhecida competência, por parte do Instituto Português da Acreditação (IPAC), para a realização de um conjunto de calibrações e ensaios metrológicos nas áreas do Comprimento, Massa, Pressão, Força, Temperatura e Humidade. Deste modo, a UMA/LNEC-EM dispõe dos meios materiais e humanos necessários à caracterização metrológica pretendida, nomeadamente, equipamento de referência rastreado a padrões dimensionais primários do SI, sala laboratorial com condicionamento ambiental apropriado a ensaios dimensionais e quadro técnico experiente e qualificado.

Nas secções seguintes é promovida uma descrição do método de medição dimensional em obra com recurso a alongâmetro, sendo mencionados os elementos constituintes e respetivos acessórios associados a este instrumento. São também apresentados os modelos matemáticos que suportam a medição indireta das grandezas de interesse movimento de abertura-fecho e deslizamento. Posteriormente, é descrito o conjunto de ensaios realizados no âmbito da caracterização metrológica de um alongâmetro, seguindo-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos e a elaboração das respetivas conclusões. Por último, são apresentados, sob a forma de anexos, o procedimento de calibração do alongâmetro e os certificados de calibração (alongâmetro e comparador analógico) emitidos no âmbito do estudo de caracterização metrológica realizado.

2 | Medição dimensional com alongâmetro

2.1 Descrição do método e instrumento de medição

O alongâmetro constitui um instrumento de medição de natureza mecânica utilizado no contexto da observação de barragens de betão para a medição de movimento de abertura-fecho e deslizamento ao nível de descontinuidades estruturais como fissuras ou juntas, por exemplo, em blocos de betão e maciços rochosos. Este tipo de observação dimensional permite acompanhar, de forma periódica e através de campanhas de medição em obra, a evolução temporal das referidas descontinuidades, contribuindo para a melhoria do conhecimento e, conseqüentemente, para a garantia de segurança estrutural. Este facto implica que os instrumentos e cadeias de medição utilizados nesse contexto possuam e evidenciem um desempenho metrológico adequado ao elevado nível de confiança exigido para as medições pretendidas, atendendo ao seu relevante impacto no processo de avaliação de segurança e às conseqüências humanas e materiais associadas a cenários de falha que se pretendem evitar e detetar atempadamente.

O método de medição dimensional associado ao alongâmetro prevê a existência de uma base triangular encastrada no local de medição, composta por três pontos de referência – materializados sob a forma de concavidades semiesféricas com um diâmetro próximo de 5 mm – os quais constituem os vértices de um triângulo aproximadamente equilátero, conforme ilustrado na Figura 2.1.

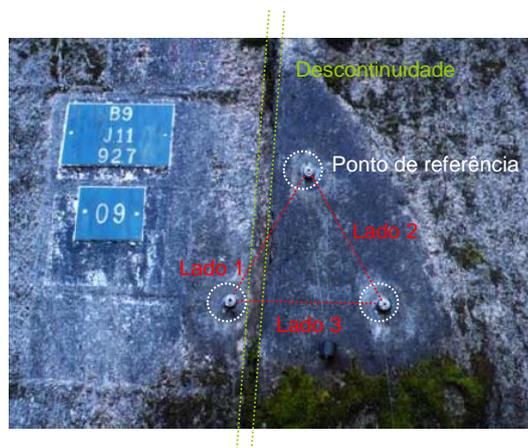


Figura 2.1 – Base triangular para medição dimensional com alongâmetro

Conforme se mostra na Figura 2.1, a descontinuidade atravessa verticalmente dois dos lados da base triangular, donde resulta que um dos pontos de referência se localiza à esquerda da descontinuidade enquanto que os restantes permanecem no lado oposto. A dimensão nominal do lado do referido triângulo equilátero está dependente do tipo de alongâmetro utilizado, sendo comuns os valores de 200 mm, 250 mm ou, em alguns casos, 500 mm. Os pontos de referência mencionados são geometricamente compatíveis com as duas ponteiros de contacto do alongâmetro (*vide* Figura 2.2), permitindo a medição dimensional dos três lados da base triangular.

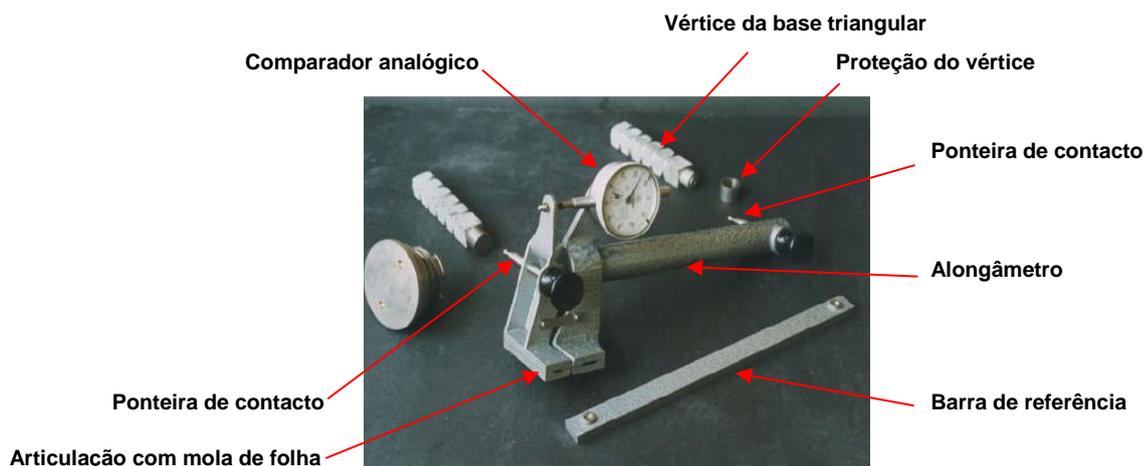


Figura 2.2 – Alongâmetro e respetivos componentes e acessórios

Salienta-se que o posicionamento inicial dos vértices da base triangular (encastramento no betão ou no maciço rochoso) é estabelecido com recurso a um elemento auxiliar – cêrcea – com duas ponteiros cónicas cuja distância mútua é idêntica à dimensão do lado da base.

Conforme se nota na Figura 2.2, o alongâmetro apresenta uma ligação elástica (mediante articulação com mola de folha) entre as duas ponteiros de contacto, assegurando a transdução mecânica do deslocamento medido entre pontos de referência para a haste de um comparador analógico. Em regra, verifica-se que o deslocamento lido no comparador corresponde ao dobro do deslocamento real medido entre pontos de referência da base, o que se traduz numa duplicação da sensibilidade de medição dimensional. Tipicamente, o deslocamento medido entre campanhas apresenta uma magnitude bastante reduzida (sub-milimétrica), compatível com a gama de medição do comparador do alongâmetro. Por exemplo, a título ilustrativo, menciona-se o caso da utilização de alongâmetro composto por um comparador com gama de medição de 10 mm e resolução de 0,01 mm que assegura uma medição da variação dimensional do lado da base numa gama de 5 mm e resolução de 0,005 mm.

A atividade de observação de barragens de betão prolonga-se no tempo ao longo de várias décadas, acompanhando as diferentes etapas da sua vida útil (construção, entrada ao serviço, exploração operacional e abandono). Este facto justifica que a utilização do alongâmetro, numa dada campanha de medição, inclua o recurso a uma barra em invar (*vide* Figura 2.2), a qual materializa uma distância de referência entre duas concavidades semiesféricas (idênticas às existentes nos pontos de referência) com valor igual à dimensão nominal do lado da base triangular. Atendendo ao reduzido coeficiente de dilatação térmica linear do invar ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), a referida distância de referência, que se assume constante no tempo¹, permite corrigir, em cada época, as leituras obtidas no alongâmetro,

¹ Tendo em conta o coeficiente de dilatação térmica linear do invar e um valor nominal da distância de referência na barra de 250 mm, uma variação sazonal extrema da temperatura do ensaio de medição dimensional igual a 40 °C, por exemplo, entre campanhas realizadas no inverno e no verão, é traduzida numa variação dimensional de, aproximadamente, 12 µm.

compensando a variação sazonal de temperatura do ensaio e a deriva instrumental do alongâmetro entre campanhas de medição.

A partir das medições dimensionais dos lados da base triangular efetuadas com recurso ao alongâmetro, é possível estimar o movimento de abertura-fecho e deslizamento na descontinuidade tendo em conta os modelos matemáticos cuja dedução é apresentada na secção seguinte.

2.2 Modelos matemáticos

Numa perspetiva geométrica e tendo em conta a Figura 2.3, um movimento de abertura-fecho da descontinuidade origina uma deformação da base triangular, na qual é válida a seguinte relação

$$L_{1n} = L_{1i} \cdot \cos(\alpha) + \Delta X \cdot \cos(60^\circ - \alpha), \quad (1)$$

onde L_{1n} e L_{1i} correspondem às dimensões do lado 1 da base triangular medidas na época inicial, i , e numa época posterior, n , respetivamente, ΔX é o movimento de abertura-fecho da descontinuidade entre as épocas i e n e α define um ângulo infinitesimal próximo de zero (dada a reduzida amplitude do movimento de abertura-fecho). Este facto determina a simplificação da expressão anterior para

$$L_{1n} - L_{1i} = \frac{\Delta X}{2}. \quad (2)$$

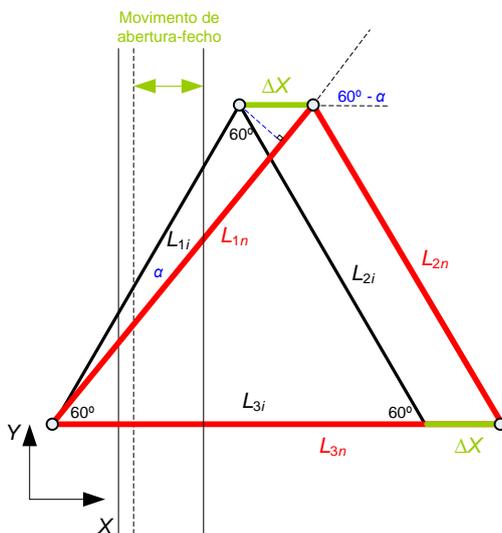


Figura 2.3 – Movimento de abertura-fecho na base triangular

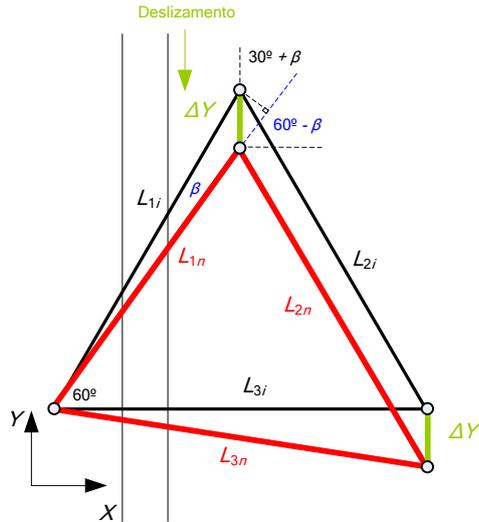


Figura 2.4 – Deslizamento na base triangular

Por sua vez, o deslizamento da descontinuidade, representado esquematicamente na Figura 2.4, dá origem a uma deformação geométrica da base triangular na qual é válida a seguinte expressão

$$L_{1_i} \cdot \cos(\beta) = L_{1_n} + \Delta Y \cdot \cos(30^\circ + \beta), \quad (3)$$

em que ΔY representa o deslizamento e β corresponde a um ângulo infinitesimal próximo de zero (dada a reduzida amplitude do deslizamento), tornando possível a simplificação da expressão anterior para

$$L_{1_n} - L_{1_i} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta Y. \quad (4)$$

Na ocorrência simultânea do movimento de abertura-fecho e deslizamento, a diferença entre medições do lado 1 da base triangular numa época posterior, n , e na época inicial, i , é traduzida por

$$L_{1_n} - L_{1_i} = \frac{\Delta X}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta Y, \quad (5)$$

tendo em conta as expressões (2) e (4). Relativamente aos restantes dois lados da base triangular, verificam-se as seguintes expressões

$$L_{2_n} - L_{2_i} = 0, \quad (6)$$

e

$$L_{3_n} - L_{3_i} = \Delta X. \quad (7)$$

A substituição da expressão (7) na expressão (5) permite escrever o modelo matemático associado à medição indireta da grandeza deslizamento através de

$$\Delta Y = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{(L_{3_n} - L_{3_i})}{2} - (L_{1_n} - L_{1_i}) \right], \quad (8)$$

suportada nas medições diretas das dimensões dos lados 1 e 3 entre épocas distintas. Note-se que a medição da grandeza movimento de abertura-fecho decorre apenas da medição do lado 1, conforme indicado na expressão (7).

Nas expressões (7) e (8) são introduzidas duas constantes, C_1 e C_2 , associadas, respetivamente, à medição da barra de referência (para correção de fenómenos de influência térmica e deriva instrumental entre épocas de medição)

$$C_1 = L_{1_n} - L_{1_i}, \quad (9)$$

onde L_{1_n} e L_{1_i} correspondem às dimensões da barra de referência medidas numa época posterior, n , e na época inicial, i , e ao fator de conversão entre o deslocamento lido no comparador e deslocamento efetivo (real) entre os vértices da base triangular (conforme referido anteriormente, o deslocamento lido no comparador corresponde a duas vezes o deslocamento real, ou seja, $C_2 = 2$). Deste modo, as grandezas movimento de abertura-fecho e deslizamento passam a ser escritas, respetivamente, por

$$\Delta X = \frac{(L_{3_n} - L_{3_i}) - C_1}{C_2}, \quad (10)$$

e

$$\Delta Y = \frac{2}{C_2 \cdot \sqrt{3}} \left\{ \frac{(L_{3_n} - L_{3_i}) - C_1}{2} - [(L_{1_n} - L_{1_i}) - C_1] \right\}, \quad (11)$$

ou seja,

$$\Delta X = \frac{(L_{3_n} - L_{3_i}) - (L_{1_n} - L_{1_i})}{2}, \quad (12)$$

e

$$\Delta Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{(L_{3_n} - L_{3_i}) - (L_{1_n} - L_{1_i})}{2} - [(L_{1_n} - L_{1_i}) - (L_{1_n} - L_{1_i})] \right\}. \quad (13)$$

3 | Caraterização metrológica do alongâmetro

3.1 Descrição dos ensaios metrológicos realizados

No âmbito da caraterização metrológica de um alongâmetro – marca LNEC, n.º informático 767.01, alcance de 5 mm e resolução igual a 0,005 mm – foram efetuados os seguintes ensaios metrológicos:

- (i) calibração do comparador analógico;
- (ii) calibração do alongâmetro (incluindo o comparador analógico previamente calibrado);
- (iii) medição dimensional da barra de referência;
- (iv) medição dimensional da cêrcea com pontas cónicas.

Todos os ensaios mencionados foram realizados nas instalações da UMA/LNEC-EM, em sala laboratorial condicionada para ensaios dimensionais em temperatura (20 ± 1) °C e humidade relativa ($\leq 65\%$), onde se promoveu a estabilização térmica prévia da montagem experimental, nomeadamente, dos padrões de referência, instrumentos de medição e componentes ensaiados.

Na atividade experimental de caraterização metrológica foi possível recorrer ao seguinte conjunto de padrões e equipamentos de referência rastreados a padrões primários nacionais ou internacionais de realização as unidades de medição de acordo com o SI de Unidades:

- (i) transdutor de deslocamento com indicador digital, n.º informático 692.01, marca Sylvac, modelo D90-P50, com gama de medição compreendida entre 0 mm e 50 mm, resolução igual a 0,1 μm e incerteza de medição instrumental correspondente a 1 μm ;
- (ii) transdutor de força com indicador digital, n.º informático 33.08, marca Burster, modelo 9162-V200, com gama de medição compreendida entre 0 N e 20 N, resolução igual a 0,01 N e incerteza de medição instrumental correspondente a 0,10 N;
- (iii) máquina de medição (por contacto) de coordenadas tridimensionais, n.º informático 203.01, marca DEA, modelo Gamma 2203, com alcance compreendido entre (2 m \times 1 m \times 0,8 m), resolução igual a 1 μm e incerteza de medição instrumental de 5 μm .

A calibração do comparador analógico foi efetuada com base na norma de referência ISO 463:2006 (ISO; 2006) (Ribeiro; 2013), tendo-se promovido a realização de dois ciclos de medições (ascendente e descendente) para avaliação da reversibilidade² e dos desvios de calibração em ambos os sentidos da medição. Em cada ciclo foram estabelecidos 100 patamares de deslocamento (com incremento de 0,1 mm entre patamares). A repetibilidade foi avaliada em três patamares da escala de medição – 10%, 50% e 100% da escala – tendo-se efetuado um conjunto de dez leituras no comparador por cada um dos referidos patamares. Os valores lidos obtidos suportaram o cálculo dos respetivos

² Valor máximo absoluto das diferenças entre valores obtidos nos sentidos ascendente e descendente.

desvios padrão experimentais das amostras, sendo a repetibilidade quantificada com base no valor máximo obtido no conjunto das três séries analisadas. O comparador foi igualmente avaliado no que respeita à força exercida pela haste em três posições de recolhimento correspondentes a 1%, 50% e 100% da escala dimensional, tendo-se determinado a diferença máxima de força entre posições.

No que respeita à calibração do alongâmetro, o método de ensaio desenvolvido recorre a máquina de medição (por contacto) de coordenadas tridimensionais (MMC 3D) e respetiva aplicação computacional que, com base no conhecimento das coordenadas espaciais dos pontos medidos, assegura a construção virtual de elementos geométricos (linhas, circunferências, esferas, cones, entre outros) no objeto medido e a quantificação de características dimensionais (distância entre elementos, por exemplo) e geométricas de interesse (ângulos, relações de ortogonalidade, paralelismo, planeza, circularidade, cilíndricidade, entre outras). No caso da calibração do alongâmetro tem particular interesse a medição da distância entre as duas ponteiras de contacto com base no conhecimento das coordenadas tridimensionais dos respetivos centros geométricos das esferas. A distância medida com recurso à MMC 3D (padrão dimensional) constitui um valor de referência o qual pode ser relacionado com o valor lido no comparador do alongâmetro.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 é apresentada a montagem experimental desenvolvida para o ensaio de calibração do alongâmetro na mesa-plano da MMC 3D, onde se destaca a cabeça micrométrica para aplicação de deslocamento à ponteira móvel do alongâmetro. O ensaio incluiu a realização de dez patamares distribuídos de forma uniforme pela gama de medição do comparador em intervalos de 0,10 mm, desde 0 mm até 10 mm), em ambos os sentidos crescente e decrescente de medição. Em cada patamar foram determinadas as coordenadas espaciais tridimensionais de 17 pontos uniformemente distribuídos no hemisfério superior de cada ponteira de contacto do alongâmetro (*vide* Figura 3.3), as quais suportaram o ajuste computacional de uma esfera ao conjunto de pontos medidos e o cálculo do seu centro geométrico.

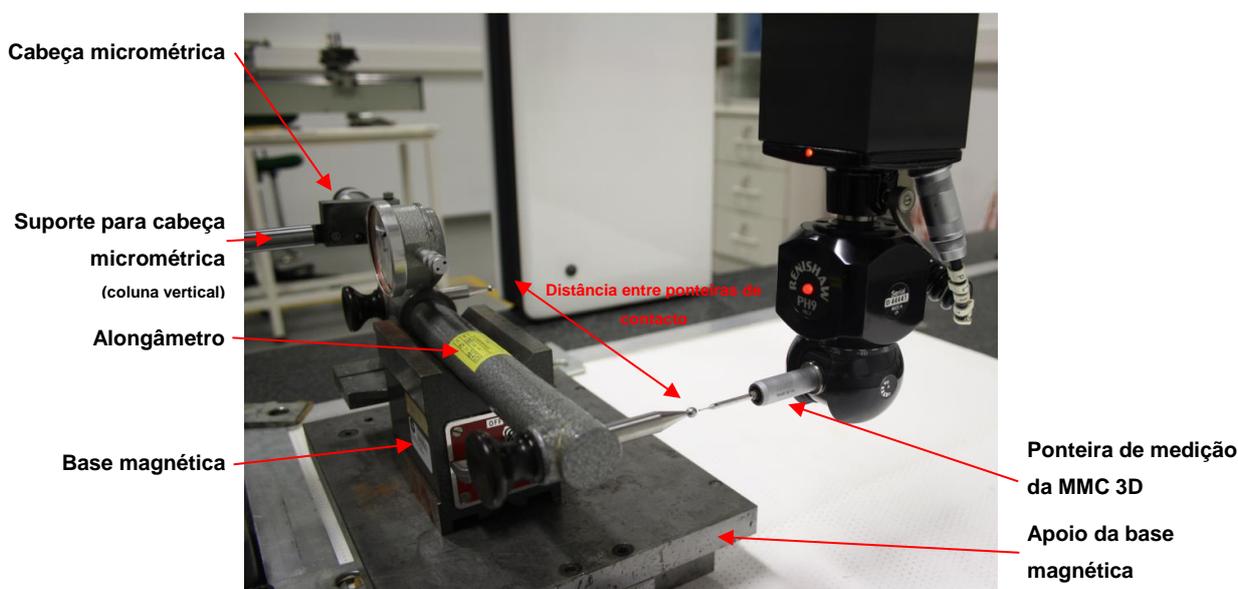


Figura 3.1 – Montagem experimental para calibração do alongâmetro

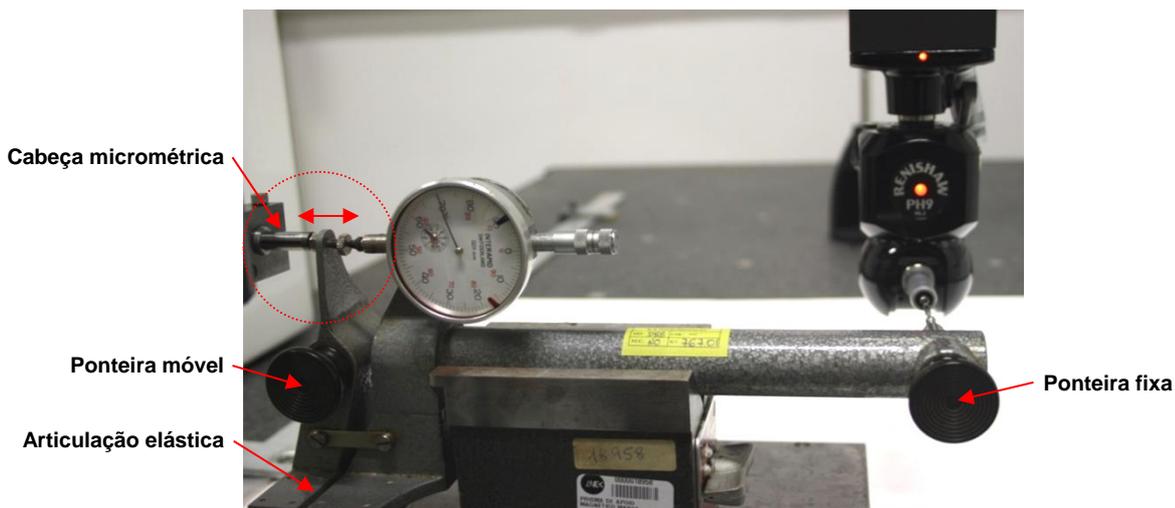


Figura 3.2 – Variação da distância entre ponteiras de contacto do alongâmetro



Figura 3.3 – Pormenor da medição dimensional da ponteira de contacto do alongâmetro

A MMC 3D foi igualmente utilizada como equipamento de referência nos ensaios de medição dimensionais da barra de referência e da cêrcea associadas ao alongâmetro calibrado. Em ambos os casos foram determinadas as coordenadas espaciais tridimensionais de 12 pontos distribuídos regularmente na superfície da concavidade (no caso da barra de referência) e do cone (no caso da cêrcea), tendo-se promovido o ajuste computacional de um cone ao conjunto de pontos medidos e calculado o seu centro geométrico. Conhecidas as coordenadas espaciais dos centros geométricos dos cones virtuais, foi possível quantificar a distância entre concavidades na barra de referência e entre cones na cêrcea. Para cada um destes elementos estudados, foram realizados cinco ensaios dimensionais tendo em vista a determinação do valor médio de distância e a quantificação da repetibilidade através do cálculo do respetivo desvio padrão experimental da amostra.

3.2 Apresentação e discussão de resultados

3.2.1 Comparador analógico

O ensaio de calibração do comparador analógico (marca Interapid, com alcance de 10 mm e divisão igual a 0,01 mm) permitiu quantificar os desvios de calibração que se mostram na Figura 3.4.

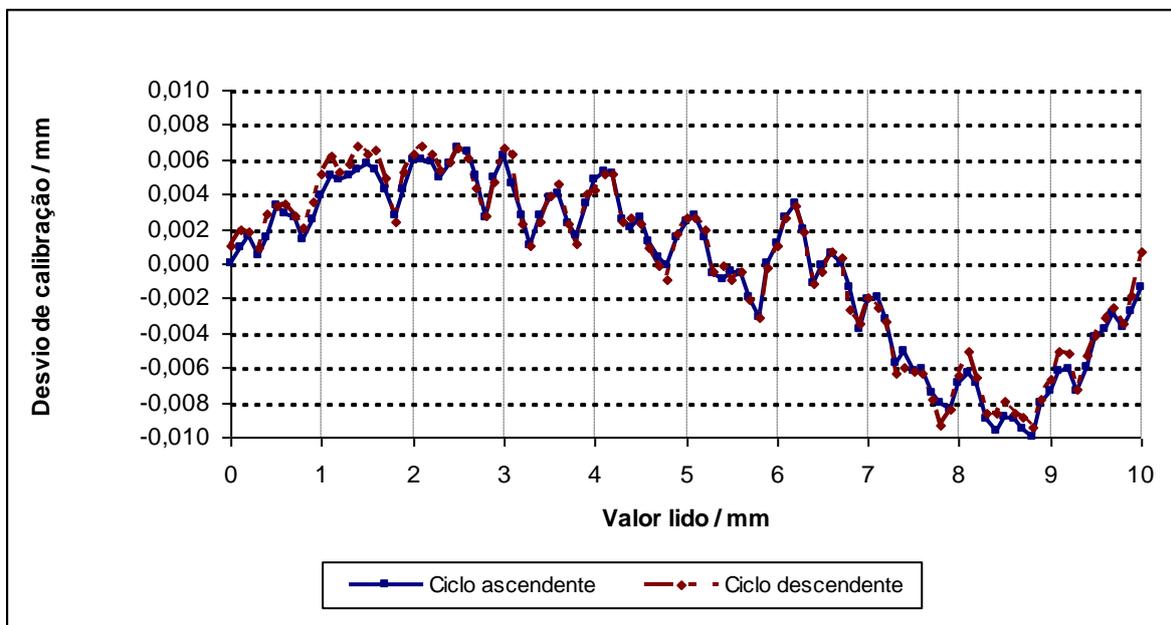


Figura 3.4 – Desvios de calibração do comparador analógico

Na Figura 3.4 é possível constatar que o desvio máximo absoluto, obtido na região da gama de medição compreendida entre 8 mm e 9 mm, corresponde a 0,010 mm no sentido ascendente e 0,009 mm no sentido descendente, verificando-se que o desvio máximo pico-a-pico se situou próximo de 0,017 mm. No que se refere à reversibilidade e à repetibilidade do comparador, os valores obtidos apresentaram uma menor magnitude – 0,002 mm e 0,001 mm, respetivamente – em comparação com os desvios de calibração mencionados anteriormente.

A incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95%) da calibração (Ribeiro; 2001) correspondeu a 7,3 μm , englobando as componentes de incerteza de medição dimensional associadas ao método (montagem e variação dimensional por efeito térmico), ao padrão de referência (calibração, desvios sistemáticos, deriva e repetibilidade instrumentais) e ao comparador (divisão).

No que se refere aos ensaios de avaliação da força exercida pela haste do comparador, foi observada uma força máxima de contacto igual a 1,10 N para um valor lido de 10 mm no comparador, constatando-se uma diferença máxima de força de 0,44 N na gama de medição dimensional compreendida entre 0,1 mm e 10 mm. No caso da grandeza força, a incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95%) correspondeu a 0,10 N associada à aceitação metrológica do padrão de força utilizado.

3.2.2 Alongâmetro

No Quadro 3.1 são apresentadas as distâncias medidas entre ponteiras de contacto do alongâmetro para os patamares de ensaio estudados enquanto que, no Quadro 3.2 se expõem os correspondentes valores de deslocamento impostos ao alongâmetro entre patamares. Salienta-se que foram obtidos valores aproximadamente idênticos em ambos os sentidos (crescente e decrescente) de imposição de deslocamento. A incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95%) associada às estimativas das distâncias medidas correspondeu a 6,2 μm , contabilizando as componentes de incerteza associadas ao método (montagem e variação dimensional por efeito térmico) e ao padrão de referência (calibração, desvios sistemáticos, deriva e repetibilidade instrumentais).

Quadro 3.1 – Valores lidos no comparador e distâncias medidas entre ponteiras de contacto do alongâmetro

Valor lido no comparador (mm)	Distância entre ponteiras de contacto do alongâmetro (mm)				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
0,00	254,305	254,302	254,302	254,301	254,308
0,10	254,257	254,255	254,254	254,259	254,254
1,20	253,696	253,696	253,697	253,700	253,698
2,30	253,142	253,141	253,141	253,144	253,144
3,40	252,586	252,587	252,587	252,586	252,587
4,50	252,029	252,033	252,035	252,031	252,035
5,60	251,479	251,478	251,477	251,478	251,477
6,70	250,926	250,925	250,925	250,928	250,927
7,80	250,367	250,365	250,366	250,366	250,366
8,90	249,807	249,808	249,809	249,809	249,810
10,00	249,265	249,266	249,266	249,265	249,268

Quadro 3.2 – Valores lidos no comparador e deslocamentos entre ponteiras de contacto do alongâmetro

Valor lido no comparador (mm)	Deslocamento entre ponteiras de contacto do alongâmetro (mm)				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,10	0,048	0,047	0,048	0,042	0,054
1,20	0,609	0,606	0,605	0,601	0,610
2,30	1,163	1,161	1,161	1,157	1,164
3,40	1,719	1,715	1,715	1,715	1,721
4,50	2,276	2,269	2,267	2,270	2,273
5,60	2,826	2,824	2,825	2,823	2,831
6,70	3,379	3,377	3,377	3,373	3,381
7,80	3,938	3,937	3,936	3,935	3,942
8,90	4,498	4,494	4,493	4,492	4,498
10,00	5,040	5,036	5,036	5,036	5,040

Os resultados expostos no Quadro 3.2 suportaram a regressão linear (por aplicação do Método dos Mínimos Quadrados) efetuada entre o valor lido no comparador e o deslocamento medido entre ponteiras de contacto do alongâmetro, conforme se mostra no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Regressão linear entre o valor lido no comparador e o deslocamento entre ponteiras de contacto

Valor médio lido no comparador (mm)	0,00	0,10	1,20	2,30	3,40	4,50	5,60	6,70	7,80	8,90	10,00
Deslocamento médio entre ponteiras (mm)	0,000	0,049	0,607	1,162	1,718	2,271	2,827	3,378	3,938	4,496	5,038
Declive	Estimativa	1,982 5					Covariância				
	Incerteza padrão	0,001 2					-3,6·10 ⁻⁶ mm ²				
Ordenada na origem	Estimativa	-0,002 1 mm					Coeficiente de correlação				
	Incerteza padrão	0,002 8 mm					-1,0				

Os resultados obtidos, em particular, as estimativas do declive e da ordenada na origem permitem que se defina uma relação linear através da expressão

$$VC = 1,9825 \cdot DP - 0,0021 \tag{14}$$

onde *VC* corresponde ao valor lido no comparador e *DP* é o deslocamento entre ponteiras de contacto do alongâmetro. As magnitudes das estimativas dos dois parâmetros lineares confirmam a duplicação da sensibilidade de medição com o alongâmetro, ou seja, o valor de deslocamento lido no comparador corresponde, aproximadamente, ao dobro do deslocamento real medido entre pontos de referência na base triangular. A expressão (14) permite quantificar os respetivos desvios de linearidade em toda a extensão da gama de medição do comparador do alongâmetro, os quais são representados graficamente na Figura 3.5.

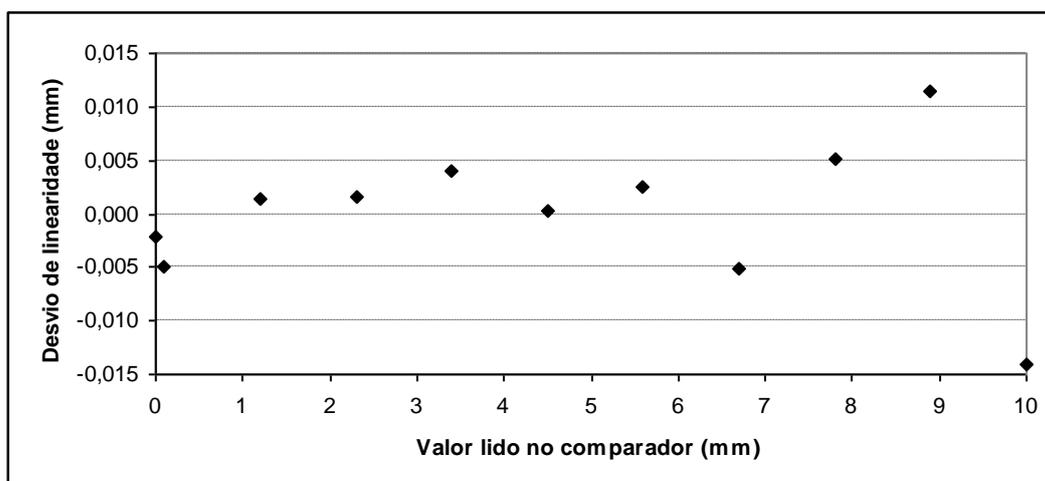


Figura 3.5 – Desvios de linearidade do alongâmetro

A Figura 3.5 mostra que o desvio máximo absoluto de linearidade (próximo de 0,014 mm) ocorre no fim de escala do comparador. De facto, é possível notar um significativo aumento da magnitude do desvio de linearidade a partir de um valor lido no comparador superior a 8 mm. Na sub-gama de medição inferior a este valor, a variação máxima de linearidade corresponde a $\pm 0,005$ mm, o que se considera aceitável face à divisão do comparador do alongâmetro (0,01 mm).

No que respeita à repetibilidade e reversibilidade associadas ao alongâmetro foram igualmente obtidos valores inferiores à divisão do comparador (0,005 mm e 0,000 mm, respetivamente).

3.2.3 Barra de referência

O Quadro 3.4 apresenta os resultados das medições da distância entre concavidades da barra de referência associada ao alongâmetro caracterizado.

Quadro 3.4 – Distância medida entre concavidades da barra de referência

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	DPEA*
250,096 mm	250,076 mm	250,095 mm	250,079 mm	205,078 mm	250,085 mm	0,010 mm

* DPEA – Desvio padrão experimental da amostra.

O valor médio da distância entre concavidades correspondeu a 250,085 mm, obtido com base numa amostra com dimensão igual a cinco e cujo desvio padrão experimental foi igual a 0,010 mm, tendo em conta uma incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95%) de 6,2 μ m [3], que combina as contribuições das componentes de incerteza associadas ao método (montagem e variação dimensional por efeito térmico) e ao padrão de referência (calibração, desvios sistemáticos, deriva e repetibilidade instrumentais).

3.2.4 Cércea com pontas cónicas

O Quadro 3.5 apresenta os resultados das medições da distância entre pontas cónicas da cércea associada ao alongâmetro caracterizado.

Quadro 3.5 – Distância medida entre pontas cónicas da cércea

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Valor médio	DPEA*
250,088 mm	250,086 mm	250,086 mm	250,087 mm	205,085 mm	250,086 mm	0,001 mm

* DPEA – Desvio padrão experimental da amostra.

Neste caso, o valor médio da distância correspondeu a 259,086 mm obtido com base numa amostra com dimensão igual a cinco e cujo desvio padrão experimental foi igual a 0,001 mm, tendo em conta uma incerteza de medição expandida (num intervalo de confiança de 95%) idêntica à referida anteriormente para a barra de referência (6,2 μ m) (Ribeiro; 2001). A diferença entre desvios padrão experimentais das amostras das medições na barra de referência e na cércea (efetuadas com o mesmo método e padrão) é justificada pelo maior afastamento entre os modelos geométricos virtual

real associados à concavidade medida na barra cuja superfície (interior) apresenta uma dimensão mais reduzida comparativamente com a superfície (exterior) da ponta cónica na cércea.

3.2.5 Incerteza de medição instrumental

Tendo em conta os resultados experimentais apresentados nas secções anteriores, foi efetuado o balanço da incerteza de medição instrumental do alongâmetro, o qual reuniu as contribuições do comparador (calibração, desvios sistemáticos, reversibilidade, repetibilidade e divisão) e do alongâmetro (calibração, linearidade e repetibilidade) para a incerteza de medição combinada. O cálculo da incerteza de medição combinada e respetiva incerteza de medição expandida (num intervalo de 95%) foi efetuado com base na aplicação da Lei de Propagação de Incertezas associada ao método ISO-GUM (GUM; 2008). Os resultados obtidos, bem como a formulação probabilística das componentes de incerteza, são apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Balanço de incerteza de medição instrumental do alongâmetro

Fonte de incerteza instrumental	Componente de incerteza	Função densidade de probabilidade	Limites de variação	Incerteza padrão de medição	Graus de liberdade
Comparador	Calibração	Normal	3,7 μm	3,7 μm	50
	Desvios sistemáticos	Uniforme	10 $\mu\text{m} / \sqrt{3}$	5,8 μm	50
	Reversibilidade	Uniforme	2 $\mu\text{m} / \sqrt{3}$	1,2 μm	50
	Repetibilidade	Normal	1,0 μm	1,0 μm	3
	Divisão	Uniforme	5 $\mu\text{m} / \sqrt{3}$	2,9 μm	50
Alongâmetro	Calibração	Normal	3,1 μm	3,1 μm	50
	Linearidade	Uniforme	14 $\mu\text{m} / \sqrt{3}$	8,1 μm	50
	Repetibilidade	Normal	5,0 μm	5,0 μm	4
Incerteza de medição combinada: 13 μm					
Graus de liberdade efetivos: 91					
Fator de expansão: 1,99					
Incerteza de medição expandida (95%): 25 μm					

O balanço de incertezas efetuado originou uma incerteza de medição expandida igual a 25 μm , tendo como componente de incerteza predominante a linearidade do alongâmetro. De facto, se apenas fossem considerados os desvios de linearidade (com valor máximo de 5 μm em vez de 14 μm) obtidos na gama de medição do comparador compreendida entre 0 mm e 8 mm, ou seja, se não fosse considerada a região de fim de escala de medição (onde foram obtidos os desvios de linearidade com maior magnitude e que pode não ser utilizada em contexto operacional), a incerteza de medição expandida corresponderia a 20 μm (obtida de uma incerteza de medição combinada igual a 10 μm com 42 graus de liberdade e um fator de expansão igual a 2,02).

4 | Conclusões

O estudo efetuado permitiu estabelecer um método de caracterização metrológica de um alongâmetro utilizado no contexto da observação de barragens de betão, incluindo o seu comparador enquanto elemento constituinte, bem como a barra de referência e a cércea que o acompanham nos ensaios em campo. Torna-se assim possível quantificar periodicamente, assegurando condições experimentais de repetibilidade ao longo do tempo, as características dimensionais mais relevantes nos elementos supracitados e avaliar a sua adequação técnica para utilização em cenário operacional.

As incertezas de medição expandidas (95%) obtidas quer nos ensaios de calibração do comparador analógico (7,3 μm) e do alongâmetro (20 μm , para valores lidos no comparador inferiores a 8 mm), quer nos ensaios dimensionais da barra de referência e da cércea (6,2 μm em ambos os elementos), apresentaram uma ordem de magnitude satisfatória para um nível de exatidão dimensional *in situ* situado na gama das centésimas de milímetro.

O estudo realizado permitiu igualmente concluir que a linearidade do alongâmetro analisado constitui uma componente de incerteza predominante para a sua incerteza de medição instrumental, sobretudo, quando se considera a região de medição próxima do fim de escala, onde os desvios de linearidade obtidos apresentaram uma magnitude bastante elevada comparativamente com a restante gama de medição. Recomenda-se que o processo de confirmação metrológica deste instrumento de medição, que determina a sua aceitação ou rejeição para utilização, tenha em conta a gama de medição que efetivamente é utilizada em cenários de observação dimensional de modo a serem evitadas rejeições do instrumento atribuídas a desvios de linearidade elevados na região do fim de escala.

O conhecimento da incerteza de medição instrumental do alongâmetro analisado permite agora proceder ao estudo futuro de propagação de incertezas de medição associadas às grandezas movimento de abertura-fecho e deslizamento, tendo em conta outras componentes adicionais de incerteza, nomeadamente, o arredondamento da estimativa associada ao fator de conversão entre o deslocamento lido no comparador e deslocamento efetivo (real), a variação dimensional da barra de referência por efeito térmico e a influência dos operadores do alongâmetro (repetibilidade e reprodutibilidade).

Lisboa, LNEC, maio de 2016

VISTO

O Diretor do Centro de Instrumentação Científica



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins
Bolsheiro de Pós-doutoramento



Álvaro Silva Ribeiro
Investigador Auxiliar
Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica

Referências Bibliográficas

- GUM:2008 – **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement**. 1st edition, Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100:2008.
- ISO 463:2006 – **Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment – Design and metrological characteristics of mechanical dial gauges**. Genève: ISO, 2006.
- RIBEIRO, Álvaro – **Avaliação da incerteza associada à calibração de equipamento de medição de comprimento por comparação directa**. LNEC - Proc. 236/11/14855. Relatório 274/01 – CIC/NQM.
- RIBEIRO, Álvaro – **Procedimento de Calibração MA/MEC.PRC.0201.00 – Comparadores digitais e analógicos**. Lisboa: LNEC, 2013.

Anexos

ANEXO I



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



ENSAIOS
e METROLOGIA

Procedimento de Calibração MA/MEC.PRC.4101.01

Alongâmetros

2015-01-09

Unidade de Metrologia Aplicada (LNEC-EM/UMA)
Setor II: Grandezas Dimensionais - Calibração

Autoria:
Núcleo de Qualidade Metrológica
Centro de Instrumentação Científica

Este procedimento é propriedade do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

1 - ÍNDICE

1 -	ÍNDICE	1
1 -	ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA	2
2 -	PRINCÍPIO DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DIMENSIONAL	2
3 -	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DIMENSIONAL.....	2
4 -	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	3
4.1 -	INTRODUÇÃO	3
4.2 -	CAPACIDADE DA UMA/LNEC-EM PARA CALIBRAR UM ALONGÂMETRO.....	3
4.3 -	PREPARAÇÃO DO ENSAIO	3
4.4 -	INSPEÇÃO VISUAL	3
4.5 -	ENSAIO DE CALIBRAÇÃO.....	4
4.6 -	DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS E DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	6
4.7 -	CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO	7
5 -	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	7
	ANEXO 1 – MODELO MATEMÁTICO E COMPONENTES DA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS	8

1 - ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA

A Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC – Ensaios e Metrologia (UMA/LNEC-EM) realiza a calibração de alongâmetros cujos comparadores apresentem uma resolução igual ou superior a 0,001 mm e uma gama de medição compreendida entre 0 mm e 50 mm. Este ensaio inclui a calibração individual do comparador enquanto elemento constituinte do alongâmetro e, por opção da entidade requisitante, pode incluir de forma complementar os ensaios dimensionais da barra de referência e da cêrcea associadas ao alongâmetro sujeito a calibração.

Para realizar a referida calibração, a UMA/LNEC-EM dispõe do seguinte equipamento de referência com rastreabilidade aos padrões primários de comprimento e força:

- grandeza comprimento:
 - transdutor de deslocamento com indicador digital;
 - máquina de medição (por contacto) de coordenadas tridimensionais (MMC 3D);
- grandeza força:
 - transdutor de força com indicador digital.

2 - PRINCÍPIO DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DIMENSIONAL

O princípio de calibração consiste na aplicação direta de deslocamento de referência ao componente móvel (ponteira de contacto no caso do alongâmetro e haste no caso do comparador) do instrumento sujeito a calibração e na comparação com o respetivo valor lido.

O princípio de medição dimensional de componentes (barra de referência e cêrcea) consiste na determinação das coordenadas espaciais tridimensionais de pontos em superfícies dos objetos medidos e na construção virtual de elementos de interesse e cálculo computacional das coordenadas associadas aos respetivos centros geométricos.

3 - MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DIMENSIONAL

O método de calibração do comparador do alongâmetro é baseado na norma de referência ISO 463:2006 [1], promovendo-se a aplicação de deslocamentos de referência na haste do comparador em montagem dedicada que inclui o padrão de referência (transdutor de deslocamento com indicador digital).

O método de calibração do alongâmetro consiste na medição computacional da distância entre as duas ponteiras de contacto com base na determinação das coordenadas tridimensionais dos centros geométricos das duas esferas representativas das referidas ponteiras, por sua vez obtidas com base nas coordenadas espaciais de pontos na superfície, quantificadas com recurso a MMC 3D, que constitui o padrão de referência. A aplicação de deslocamento entre ponteiras de

contacto do alongâmetro é efetuada através de acionamento de cabeça micrométrica incluída na montagem experimental definida para este âmbito.

O método de medição dimensional da barra de referência e da cércea do alongâmetro é igualmente suportado na utilização da MMC 3D cuja componente computacional assegura a construção e a medição virtual de elementos dimensionais e geométricos de interesse nos componentes ensaiados.

4 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

4.1 - Introdução

Apresenta-se, a seguir, um procedimento de calibração de alongâmetros elaborado pelo Núcleo de Qualidade Metrológica do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, o qual inclui os ensaios do comparador, alongâmetro, barra de referência e cércea.

4.2 - Capacidade da UMA/LNEC-EM para calibrar um alongâmetro

Quando solicitada para calibrar um alongâmetro, a UMA/LNEC-EM avaliará a sua capacidade para efetuar a operação tendo em conta a gama de medição e a resolução deste, bem como o nível de exatidão associado à sua capacidade de medição e calibração neste âmbito.

4.3 - Preparação do ensaio

Efetuar a limpeza do alongâmetro com recurso a pano macio, em particular, as ponteiras de contacto do alongâmetro e do comparador, as concavidades da barra de referência e as pontas cónicas da cércea.

Colocar o alongâmetro a calibrar e respetivos acessórios (barra de referência e cércea) no laboratório pelo menos uma hora antes de executar o ensaio de calibração.

4.4 - Inspeção visual

Observar o aspeto exterior do alongâmetro a calibrar e respetivos acessórios (barra de referência e cércea) e anotar eventuais sinais de degradação, designadamente, nas ponteiras de contacto, no comparador (caixa, ponta de contacto, mostrador e ponteiro ou indicador digital), na articulação elástica do alongâmetro, nas concavidades da barra de referência e nas pontas da cércea (ver Figura 1).

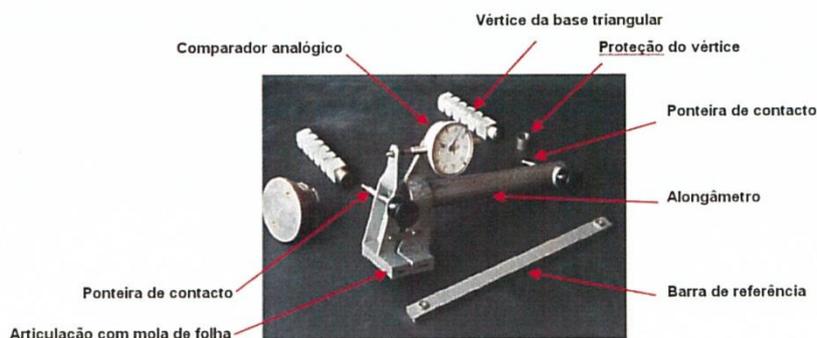


Figura 1 – Alongâmetro e respetivos componentes e acessórios

4.5 - Ensaio de calibração

O ensaio de calibração consta de três partes: (A) calibração do comparador; (B) calibração do alongâmetro (incluindo o comparador previamente calibrado); (C) medição dimensional da barra de referência e da cêrcea.

A - Ensaio de calibração do comparador

- a. Remover o comparador do alongâmetro mediante desaperto de parafusos de ligação entre ambos;
- b. Realizar ensaio de calibração de acordo com o procedimento interno UMA/LNEC-EM para comparadores digitais e analógicos [2];
- c. Finalizada a operação de calibração do comparador, proceder à sua montagem no alongâmetro e ajuste de zero.

B - Ensaio de calibração do alongâmetro

- a. Fixar o braço do alongâmetro numa base magnética, em posição horizontal, no apoio colocado na mesa-plano da MMC 3D, conforme ilustrado na Figura 2;
- b. Colocar a coluna vertical na mesa-plano da MMC e efetuar a montagem de cabeça micrométrica em posição horizontal recorrendo a acessório dedicado. Promover o alinhamento longitudinal do eixo da haste da cabeça micrométrica com o eixo da haste do comparador (vide Figuras 3 a 5). Verificar se a montagem efetuada permite a aplicação de deslocamento da haste do comparador na totalidade da sua gama de medição mantendo o referido alinhamento longitudinal;

c. Aplicar deslocamentos crescentes à ponta de contacto do comparador efetuando medições¹ nos seguintes patamares de ensaio²: início do intervalo de medição e em todos os patamares seguintes considerando incrementos de 1/10 da amplitude de uma volta completa, até se atingir o alcance máximo do comparador;

Exemplo de seleção de patamares de calibração para um instrumento analógico com 10 voltas, alcance igual a 10 mm e resolução igual a 0,01 mm: 0,00 mm; 0,10 mm; 1,20 mm; 2,30 mm; 3,40 mm; 4,50 mm; 5,60 mm; 6,70 mm; 7,80 mm; 8,90 mm; 10,00 mm.

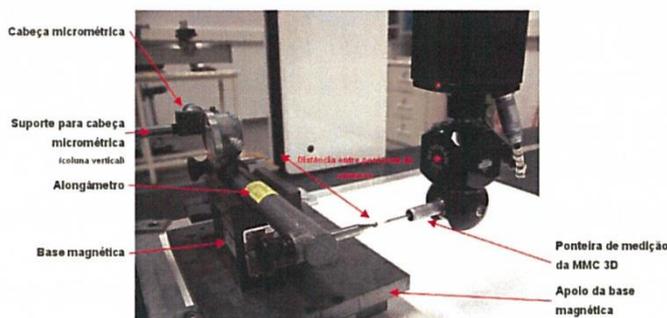
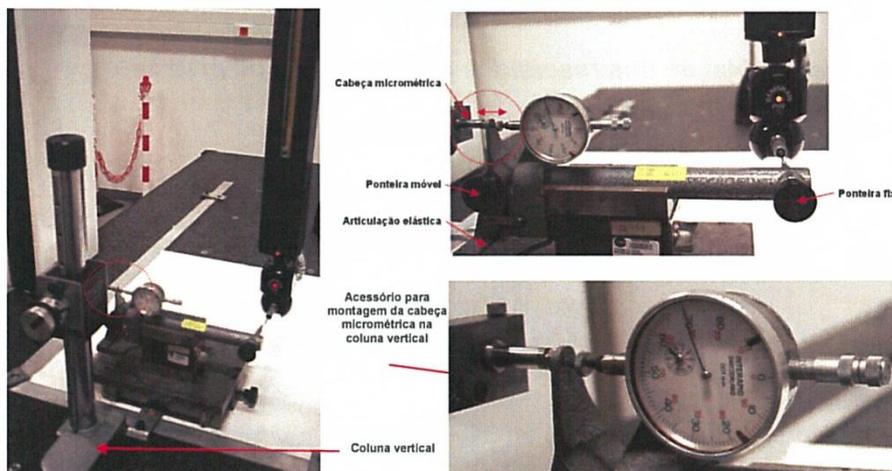


Figura 2 – Montagem do alongâmetro na mesa-plano da MMC 3D



Figuras 3 a 5 – Montagem da coluna vertical com cabeça micrométrica na mesa-plano da MMC 3D

¹ Em cada patamar são determinadas as coordenadas espaciais de 17 pontos uniformemente distribuídos no hemisfério superior de cada ponta de contacto do alongâmetro (conforme ilustrado na Figura 2), as quais suportam o ajuste computacional de uma esfera ao conjunto de pontos medidos e o cálculo do seu centro geométrico.

² Em cada patamar deverá acertar-se, em primeiro lugar, a indicação do instrumento a calibrar, sem alteração da sequência crescente ou decrescente do ensaio, e efetuar-se, a seguir, a correspondente medição com o equipamento de referência (MMC 3D).

d. Ultrapassar ligeiramente o último patamar do ciclo anterior (se possível, cinco unidades de resolução) e iniciar um ciclo de deslocamento decrescente nos mesmos patamares do ciclo descrito em c. registando os valores obtidos;

e. Repetir os pontos c. e d. quatro vezes tendo em vista a determinação da repetibilidade.

C - Ensaio dimensional da barra de referência e da cércea

a. Colocar a barra de referência e a cércea na mesa-plano da MMC 3D;

b. Determinar as coordenadas espaciais tridimensionais de 12 pontos distribuídos uniformemente pela superfície interior de cada concavidade da barra de referência;

c. Com base nos pontos medidos para cada concavidade, efetuar a construção virtual de elemento geométrico cónico e determinar o respetivo centro geométrico;

d. Determinar a distância tridimensional entre os centros geométricos associados às duas concavidades medidas na barra;

e. Repetir os pontos b. a d. quatro vezes e determinar o respetivo valor médio e a repetibilidade;

f. Repetir os pontos b. a e. para a medição dimensional da cércea.

4.6 - Determinação dos resultados e da incerteza de medição

No ensaio de calibração do comparador do alongâmetro calcular:

- 1. os desvios de calibração nos sentidos ascendente e descendente;*
- 2. os desvios máximos nas duas direções e nos sentidos ascendente e descendente;*
- 3. a reversibilidade (desvio máximo absoluto entre os sentidos ascendente e descendente) e a repetibilidade (valor máximo dos desvios padrão experimentais das amostras);*
- 4. a força máxima de contacto e a máxima diferença de força entre posições da haste do comparador;*
- 5. a incerteza de medição expandida (força e comprimento) para um intervalo de confiança de 95% de acordo com [3] e [4].*

Por sua vez, no ensaio de calibração do alongâmetro calcular:

- 1. as estimativas, incertezas de medição padrão e coeficiente de correlação dos parâmetros lineares – declive e ordenada na origem – da relação valor lido no*

comparador em função do deslocamento de referência medido entre ponteiros de contacto.

2. *a linearidade, entendida como o desvio máximo absoluto entre valores calculados (da relação linear obtida em 1.) e valores observados experimentalmente;*
3. *a reversibilidade e a repetibilidade;*
4. *a incerteza de medição expandida para um intervalo de confiança de 95% de acordo com [3] e [4].*

Por último, no ensaio de medição dimensional da barra de referência e da cêrcea, calcular a distância média entre concavidades e pontas cónicas, respetivamente, e determinar a repetibilidade do ensaio.

4.7 - Certificados de calibração

Preencher os certificados de calibração do comparador e do alongâmetros de acordo com [5] referindo:

- *a identificação da entidade requisitante;*
- *a identificação do instrumento a calibrar;*
- *a identificação do equipamento e padrões de calibração utilizados;*
- *a temperatura e a humidade relativa ambientais;*
- *as observações gerais e de inspeção visual;*
- *os valores de referência, os valores lidos e respetivos desvios calculados;*
- *a reversibilidade e a linearidade associadas ao instrumento a calibrar, se aplicável;*
- *a repetibilidade dos resultados do ensaio de calibração;*
- *a incerteza de medição expandida para um intervalo de confiança de 95%.*

5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- [1] ISO 463:2006 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment – Design and metrological characteristics of mechanical dial gauges. Genève: ISO, 2006.
- [2] RIBEIRO, Álvaro – Procedimento de Calibração MA/MEC.PRC.0201.00 – Comparadores digitais e analógicos. Lisboa: LNEC, 2013.
- [3] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1st edition, JCGM 100:2008.
- [4] RIBEIRO, Álvaro – Avaliação da incerteza associada à calibração de equipamento de medição de comprimento por comparação directa. Relatório 274/01, Lisboa: LNEC, 2001.
- [5] Vocabulário Internacional de Metrologia. 3ª edição, Caparica: IPQ, 2008.

ANEXO 1 – MODELO MATEMÁTICO E COMPONENTES DA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS

A calibração de equipamentos de medição dimensional visa a identificação e quantificação de desvios de calibração, δl_i , dados pelas diferenças entre os valores lidos (ou valores nominais, no caso de padrões que materializam uma grandeza dimensional), l_i , e os valores convencionais ou valores de referência, $l_{s,i}$, traduzindo-se esse modelo matemático na seguinte expressão:

$$\delta l_i = l_i - l_{s,i}. \quad (A1)$$

Os valores observados estão sujeitos ao efeito de dilatação térmica devido à variação de temperatura que habitualmente ocorre durante o processo de calibração, pelo que o modelo matemático anterior deverá ser complementado com a contribuição associada à correção devido à diferença da temperatura dos equipamentos relativamente à temperatura de referência de 20 °C:

$$\delta l = l(1 + \alpha \cdot \delta \theta) - l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta \theta_s), \quad (A2)$$

em que $\delta \theta = (\theta - \theta_{ref}) = (\theta - 20^\circ \text{C})$ e $\delta \theta_s = (\theta_s - \theta_{ref}) = (\theta_s - 20^\circ \text{C})$.

A expressão (A2) pode ser reformulada da seguinte forma:

$$l = \frac{l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta \theta_s) + \delta l}{(1 + \alpha \cdot \delta \theta)}, \quad (A3)$$

$$l = [l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta \theta_s) + \delta l] \cdot \left[\frac{1}{1 + \alpha \cdot \delta \theta} \right]. \quad (A4)$$

Considerando que o segundo termo do segundo membro é uma função do tipo $(1 \pm x)^n$, pode-se substituir esse termo pela seu desenvolvimento em série de Taylor (no caso, de terceira ordem), o qual possui a seguinte expressão genérica:

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm n \cdot x + \frac{n(n-1)}{2!} \cdot x^2 \pm \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \cdot x^3 + R_3, \quad (A5)$$

onde R_3 representa o termo residual de terceira ordem.

Aplicando (A5) ao segundo termo do segundo membro de (A4) desenvolvido na sua primeira ordem vem

$$(1 + \alpha \cdot \delta \theta)^{-1} = 1 - \alpha \cdot \delta \theta + R_1. \quad (A6)$$

Usando esta aproximação em (A4) resulta

$$l \approx [l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta \theta_s) + \delta l] \cdot [1 - \alpha \cdot \delta \theta] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow l \approx l_s + \delta l + l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s - l_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta - l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta - \delta l \cdot \alpha \cdot \delta\theta. \quad (A7)$$

assumindo que as relações de proporcionalidade seguintes são adequadas tendo em consideração as magnitudes das grandezas em causa,

$$l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta \ll l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s, \quad (A8)$$

$$\delta l \cdot \alpha \cdot \delta\theta \ll \delta l. \quad (A9)$$

Aplica-se uma simplificação à expressão (A7) que toma a seguinte forma:

$$l \approx l_s + \delta l + l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s - l_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta \Leftrightarrow \quad (A10)$$

$$\Leftrightarrow l \approx l_s + \delta l + l_s (\alpha_s \delta\theta_s - \alpha \cdot \delta\theta). \quad (A11)$$

O passo final consiste em promover as mudanças de variáveis

$$\Delta\alpha = (\alpha - \alpha_s), \quad (A12)$$

$$\Delta\theta = (\theta - \theta_s), \quad (A13)$$

permitindo obter

$$\begin{aligned} l_s (\alpha_s \cdot \delta\theta_s - \alpha \cdot \delta\theta) &= -l_s (\alpha \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta_s) = \\ &= -l_s (\alpha \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta + \alpha_s \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta_s) = \\ &= -l_s (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta). \end{aligned} \quad (A14)$$

e, conseqüentemente,

$$l \approx l_s + \delta l - l_s (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta). \quad (A15)$$

Esta última expressão constitui o modelo matemático aplicável (de acordo com o GUM [3]) a este tipo de medição, de natureza dimensional, representando uma função das seguintes variáveis:

$$l = f(l_s, \delta l, \alpha_s, \delta\theta, \Delta\alpha, \Delta\theta). \quad (A16)$$

A determinação dos coeficientes de sensibilidade aplicada ao modelo matemático adotado origina as seguintes parcelas:

$$\begin{aligned} c_{l_s} &= \frac{\partial f}{\partial l_s} = 1 - (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta) \approx 1 & c_{\delta l} &= \frac{\partial f}{\partial (\delta l)} = 1 \\ c_{\alpha_s} &= \frac{\partial f}{\partial \alpha_s} = -l_s \cdot \Delta\theta \approx 0 & c_{\delta\theta} &= \frac{\partial f}{\partial (\delta\theta)} = -l_s \cdot \Delta\alpha \approx 0 \end{aligned}$$

Alongâmetros

MA/MEC.PRC.4101.01:2015

$$c_{\Delta\alpha} = \frac{\partial f}{\partial(\Delta\alpha)} = -l_s \cdot \delta\theta$$

$$c_{\Delta\theta} = \frac{\partial f}{\partial(\Delta\theta)} = -l_s \cdot \alpha_s$$

Segue-se a identificação das fontes de incerteza que podem contribuir para a avaliação da incerteza de medição padrão, apontadas no diagrama que se segue e descritas na Tabela A2.1.

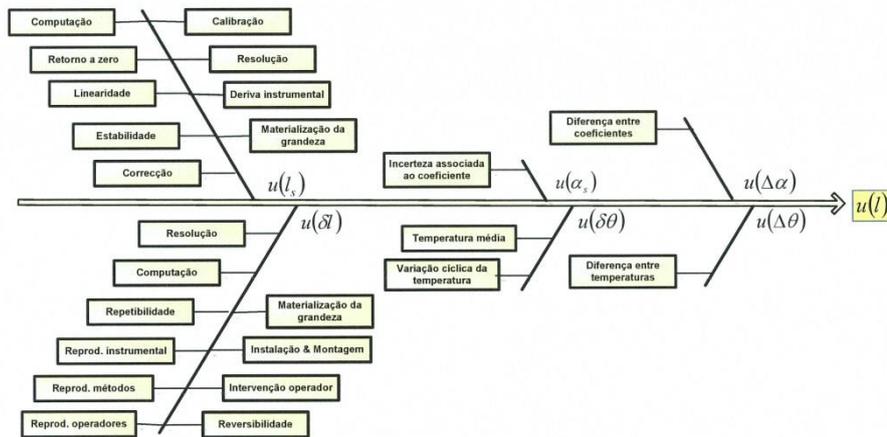


Figura A2.1 – Contribuições para a incerteza de medição do valor lido.

Nota: quando considerado aconselhável ou praticável, as contribuições associadas à calibração, correção dos valores de referência e deriva podem ser agrupadas no parâmetro designado por incerteza instrumental alvo aplicada no critério de confirmação metrológica.

Tabela A2.1 – Descrição de características das componentes de incerteza

Grandeza de entrada	Contribuição	PDF adoptada	Informação de quantificação	Coefficiente de sensibilidade	Graus de liberdade
l_s	Calibração	Normal	Certificado de calibração (Tipo B)	1	n_{cc}
	Resolução	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Deriva instrumental	Triangular	Certificado de calibração (Tipo B)	1	50
	Materialização da grandeza	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Aritmética finita / computação	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Retorno a zero	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Linearidade	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Estabilidade	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Correções dos valores de referência	Rectangular	Certificado calibração - regressão (Tipo B)	1	50
δl	Resolução do equipamento a calibrar	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Aritmética finita / computação	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Repetibilidade	Normal	Dados experimentais (Tipo A)	1	$(n - 1)^{***}$
	Reprodutibilidade (instrumental)	Normal	Dados experimentais (Tipo B)	1	n_{pm}
	Reprodutibilidade (métodos)	Normal	Dados experimentais (Tipo B)	1	n_{pm}
	Reprodutibilidade (operadores)	Normal	Dados experimentais (Tipo B)	1	n_{po}
	Materialização da grandeza	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Instalação e montagem	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Intervenção do operador	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
	Reversibilidade	Rectangular	Caracterização metrológica (Tipo B)	1	50
α_s	Valor nominal do coeficiente linear de expansão térmica do equipamento de referência	Rectangular	Bibliografia de referência (Tipo B)	$-0,1 l_s \text{ m}^\circ\text{C}$	50
	Diferença média da temperatura do eq. a calibrar relativamente à temperatura de referência.	Rectangular	Dados experimentais (Tipo B)	$-5 \cdot 10^{-6} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$	50
$\delta\theta$	Varição cíclica da temperatura no ambiente laboratorial	Arcoseno	Dados experimentais (Tipo B)	$-5 \cdot 10^{-6} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$	50
	Diferença entre coeficientes de expansão térmica (equipamentos a calibrar e de referência).	Rectangular	Bibliografia de referência (Tipo B)	$-0,5 l_s \text{ m}^\circ\text{C}$	50
$\Delta\alpha$	Diferença de temperatura entre equip.s a calibrar e de referência.	Rectangular	Dados experimentais (Tipo B)	$-1,15 \cdot 10^{-5} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$	50
$\Delta\theta$					

* Os graus de liberdade indicados são aqueles geralmente adotados, podendo ser modificados quando justificados pelas condições específicas de execução das calibrações.

** Graus de liberdade expressos no certificado de calibração

*** n representa a dimensão da amostra experimental utilizada na determinação da repetibilidade (estimada com base no desvio-padrão experimental da média).

ANEXO II



Certificado n.º 0641/2014 - UMA
 Pág 1/2
 Processo n.º 0904/1302/12469
 Pedido n.º -

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Visto 
 Carlos Oliveira Costa
 Diretor do LNEC

Cliente / Customer

Designação DBB / NO - LNEC-EM
 (Customer name)
 Endereço LNEC
 (Address)

Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação Alongâmetro
 (Name) Dial strain gauge
 Marca e modelo LNEC / ---
 (Brand and model)
 Identificação e n.º de voltas 767.01 - N.º de voltas: 10
 (Id. data and number of laps)
 Divisão e alcance 0,01 mm ; 10 mm
 (Division)

Equipamento padrão de referência / Reference standards

Designação Máquina de medição de coordenadas 3D
 (Name) 3D coordinate measuring machine
 Dados de identificação 203.01
 (Id. data)
 Rastreabilidade Os resultados apresentados no certificado estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI.
 (Traceability) The results presented are traceable to national or international standards according to SI.

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração 2015-01-16 (aaaa-mm-dd)
 (Calibration date) (yyyy-mm-dd)
 Local de calibração Instalações da Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC-EM
 (Testing place) LNEC-EM Applied Metrology Laboratory Unit facilities
 Condições ambientais Temperatura: (20 ± 1) °C , Humidade rel. ≤ 65%
 (Environmental conditions) Temperature: (20 ± 1) °C , Rel. Humidity ≤ 65 %
 Procedimento/Norma Proc. UMA (LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.4101.00 (2015)
 (Procedure / Norm) Internal procedure UMA (LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.4101.00 (2015)

Observações / Notes

Inspeção visual Nada a assinalar.
 (Visual inspection) Nothing to report
 Observações gerais Inclui comparador analógico e duas barras de referência.
 (General remarks) Includes dial gauge and two reference bars.

LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica
 Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel (+351) 21 844 30 00 • fax (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim a qual se faz referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso, a responsabilidade do LNEC. Os resultados são válidos para os itens calibrados.

LNEC 2014

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Visto Carlos Oliveira Costa
 Diretor do INEC

Resultados / Results

Parâmetros lineares

(Linear parameters)

Declive 1,983
 (Slope)
 Ordenada na origem -0,0021
 (Intercept)

$VC = \text{declive} \times DP + \text{ordenada}$

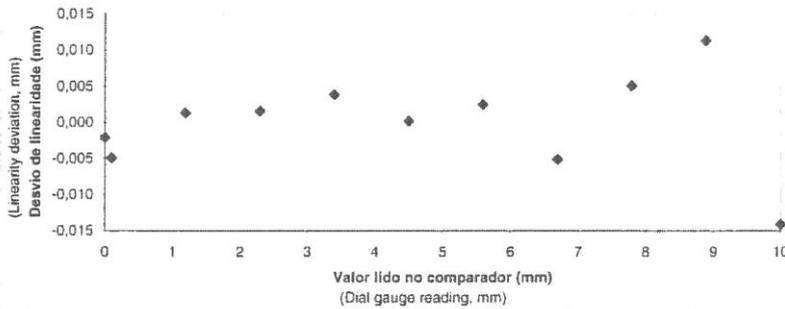
($VC = \text{slope} \times DP + \text{intercept}$)

VC - valor lido no comparador

(VC - dial gauge reading)

DP - desloc. entre pontas do alongâmetro

(DP - displacement between the dial strain gauge tips)



Reversibilidade: 0 mm (Reversibility)
 Repetibilidade: 0,005 mm (Repeatability)
 Barras de referência (Reference bars)
 C/ pontas cônicas (With conic tips) 250,086 mm
 C/ concavidades (With concavities) 250,085 mm

Linearidade: 0,014 mm (Linearity)
 Incert. de medição expandida (95%): 6,2 µm
 Expanded uncertainty of measurement (95%)

Distância média entre pontas (Average distance between tips)

Data de emissão: Lisboa, 27 de janeiro de 2015
 (Date of issue)

Assinaturas / Signatures

O Técnico
 (The Technician)
 Alexandre Pinheiro
 (Alexandre Pinheiro)

O Coordenador da UMA/LNec-EM
 (Head of the Applied Metrology Laboratory)
 Álvaro S. Ribeiro
 (Álvoro S. Ribeiro)

Notas:

The Portuguese Institute of Accreditation (IPAC) is one of the signatories of the International Laboratory Accreditation Co-operation (ILAC) arrangement for the mutual recognition of Calibration Certificates. IPAC is also one of the signatories of the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for the mutual recognition of Calibration Certificates issued by accredited laboratories.

A incerteza expandida de medição, calculada de acordo com o documento EA-4/02, está expressa pela incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k=2,00 calculado segundo uma distribuição t com 50 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida de 95%.

The expanded uncertainty of measurement, evaluated according with the guide EA-4/02, is expressed by the product of the standard uncertainty by the expansion factor k=2,00 evaluated using a t-Student distribution with 50 degrees of freedom, in order to achieve an expanded probability of 95%.

LNec - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica
 Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnec@lnec.pt www.lnec.pt

Não é permitida a reutilização, parcial ou total, dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao INEC, a não ser que seja feita expressa autorização. Salvo indicação em contrário, todos os elementos identificados nos equipamentos ou produtos calibrados são propriedade intelectual de instrumentação, escalas ou de outras entidades em colaboração com o INEC. Os resultados são válidos para os itens calibrados.

INEC 13/41

ANEXO III

LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIENTÍFICA

LNEC-EM Engenharia e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0020/2015-UMA

Pág 1/2

Processo n.º 0904/1302/12469

Pedido n.º ---

Carlos Queiroz
Diretor do CIC

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Cliente / Customer

Designação DBB / NO / LNEC-EM

(Customer name)

Endereço LNEC

(Address)

Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação Comparador analógico

(Name)

Dial gauge

Marca e modelo Interapid / ---

(Brand and model)

Identificação e n.º de voltas 767.01 ; 10

(Id. data and number of laps)

Divisão e alcance 0,01 ; 10 mm

(Division)

Equipamento padrão de referência / Reference standards

Designação Transdutor de deslocamento e transdutor de força

(Name)

Length transducer and force transducer

Dados de identificação 692.01 ; 33.08

(Id. data)

Rastreabilidade

Os resultados apresentados no certificado estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI.

(Traceability)

The results presented are traceable to national or international standards according to SI.

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração 2015-01-15

(aaaa-mm-dd)

(Calibration date)

(yyyy-mm-dd)

Local de calibração Instalações da Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC-EM

(Testing place)

LNEC-EM Applied Metrology Laboratory Unit facilities

Condições ambientais

Temperatura = (20 ± 1) °C , Humidade rel. ≤ 65 %

(Environmental conditions)

Temperature (20 ± 1) °C , Rel. Humidity ≤ 65 %

Procedimento/Norma

Proc. UMA(LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.0201.00 (2014)

(Procedura / Norm)

Internal procedure UMA (LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC 0201.00 (2014)

Observações / Notes

Inspeção visual Nada a assinalar

(Visual inspection)

(Nothing to report)

Observações gerais

Nada a assinalar

(General remarks)

(Nothing to report)

LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados apresentados neste Boletim de análise. Qualquer referência ao LNEC não constitui uma declaração de responsabilidade. Salvo indicação em contrário, os elementos identificados nos equipamentos ou em fichas calibradas são simples transmissões de informações recebidas ou fornecidas, não constituindo uma garantia por parte da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.

(1 de 24 p.)





LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA C.VIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0020/2015-UMA

Pág. 2/2

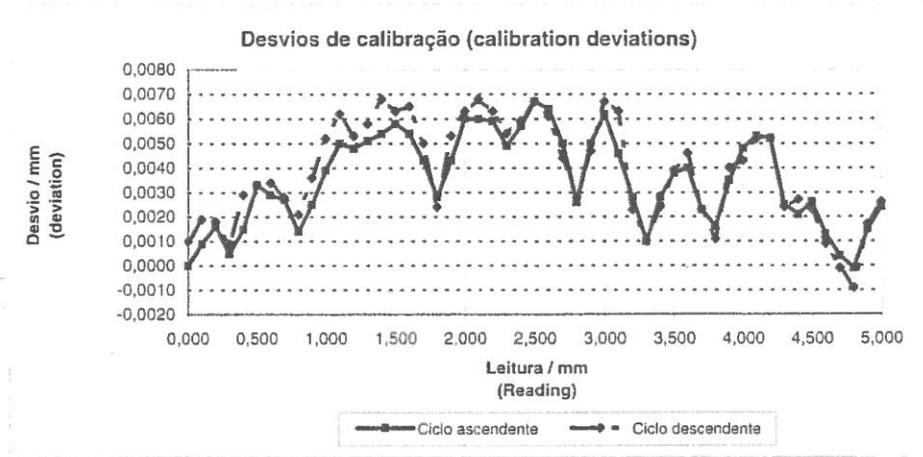
Processo n.º 0904/1302/12469

Pedido n.º --

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Visto
Cátios
Director do C.C.

Resultados / Results



Força máx. contacto: (Maximum contact force)	(110 ± 10) cN	Erro máx. nas duas direções: (Error of indication (maximum) in both directions of plunger)	0,017 mm
Máx. diferença de força: (Force maximum difference)	(44 ± 10) cN	Erro máx. no sentido crescente: (Error of indication in one direction of plunger)	0,010 mm
Reversibilidade: (Reversibility)	0,002 mm	Erro máx. no sentido decrescente: (Error of indication in one direction of plunger)	0,009 mm
Repetibilidade: (Repeatability)	0,001 mm	Incerteza expandida de medição (95%) = 0,0073 mm Expanded uncertainty of measurement (95%)	
Data de emissão: (Date of issue)	Lisboa, 27 de janeiro de 2015		

Assinaturas / Signatures

O Técnico
(The Technician)

(João A. Fernandes)

O Coordenador da UMA/LNEC-EM
(Head of the Applied Metrology Laboratory)

(Álvaro S. Ribeiro)

Notas:

The Portuguese Institute of Accreditation (IPAC) is one of the signatories of the International Laboratory Accreditation Co-operation (ILAC) arrangement for the mutual recognition of Calibration Certificates. IPAC is also one of the signatories of the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for the mutual recognition of Calibration Certificates issued by accredited laboratories.

A incerteza expandida de medição, calculada de acordo com o documento EA-4/02, está expressa pela incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k=2,00 calculado segundo uma distribuição t com 50 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida de 95%.

The expanded uncertainty of measurement, evaluated according with the guide EA-4/02, is expressed by the product of the standard uncertainty by the expansion factor k=2,00 evaluated using a t Student distribution with 50 degrees of freedom, in order to achieve an expanded probability of 95%.

LNEC - CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metroológica
Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste B. Letim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de outras fontes, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados são válidos para os itens calibrados.



