



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/11/17804

REVISÃO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE DEFÓRMETROS UNIDIMENSIONAIS

Estudo realizado no âmbito do Projecto de Investigação
“Desenvolvimento da Qualidade Metrológica de Instru-
mentação Científica Aplicada em Engenharia Civil”

Lisboa • Janeiro de 2011

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 6/2011 – NQM

Revisão do Procedimento de Calibração de Defómetros Unidimensionais

Resumo

O presente relatório apresenta a revisão do procedimento para a calibração de defómetros unidimensionais desenvolvido no Centro de Instrumentação Científica do LNEC, notando que estes defómetros integram as cadeias de medição de almofadas planas de grande área (LFJ – *Large Flat Jack*) aplicadas, pelo Departamento de Barragens de Betão do LNEC, em ensaios *in situ* visando a caracterização da deformabilidade de maciços rochosos, por exemplo, em fundações de barragens.

Revision of the Unidimensional Deformeters Calibration Procedure

Abstract

This report presents the revision of the unidimensional deformeters calibration procedure developed at LNEC's Scientific Instrumentation Centre. These deformeters integrate the measuring chains of Large Flat Jacks (LFJ) used, by LNEC's Concrete Dams Department, to test *in situ* the characterization of rock mass deformability, e. g., on dam foundations.

Révision de la Procédure d'Étalonnage des Jauges de Déformation Uni-dimensionnelle

Résumé

Ce rapport présente la révision d'une procédure pour l'étalonnage des jauges de déformation uni-dimensionnelle développée au Centre d'Instrumentation Scientifique du LNEC. Ces jauges de déformation intègrent les chaînes de mesure des vérins plans de grand surface (LFJ – *Large Flat Jack*) appliqués, par le Département des Barrages en Béton du LNEC, aux essais *in situ* visant la caractérisation de la déformabilité des massifs rocheux, par exemple, aux fondations des barrages.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. CONTEÚDO DO RELATÓRIO	3
Anexo 1 Procedimento de Calibração de Defómetros	
Unidimensionais (Versão 2)	5

REVISÃO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE DEFÓRMETROS UNIDIMENSIONAIS

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do processo “Desenvolvimento da Qualidade Metrológica de Instrumentação Científica Aplicada em Engenharia Civil” o Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica tem promovido, entre outros estudos, a elaboração de procedimentos aplicáveis à calibração de instrumentos de medição e ao ensaio de equipamentos laboratoriais.

Esta actividade foi inicialmente orientada para a satisfação das necessidades do Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC), inserido no NQM, dos laboratórios de ensaio acreditados do LNEC e, ainda, de clientes externos. No entanto, a vocação natural de serviço transversal do NQM tem conduzido a uma crescente solicitação deste tipo de actividade por parte de sectores do LNEC, antes não abrangidos, que desenvolvem acções fora do ambiente laboratorial comum, nomeadamente, realizando ensaios de campo.

Alguns destes ensaios são realizadas num enquadramento particularmente relevante para a actividade regular do LNEC, sendo este o caso da aplicação das almofadas planas de grande área (LFJ – *Large Flat Jack*), que permitem uma avaliação da deformabilidade de maciços rochosos pelo Departamento de Barragens de Betão, visando assegurar requisitos técnicos associados a fundações de barragens. As condições que influenciam estes ensaios em campo determinam a qualidade dos resultados das medições obtidas, pelo que se procura que estas possuam o maior rigor.

No processo de garantia da qualidade, a calibração da instrumentação científica desempenha um papel importante não só por contribuir para o estabelecimento da necessária rastreabilidade das medições no contexto do Sistema Internacional de Unidades (SI) como, também, por promover a obtenção de estimativas adequadamente corrigidas de factores perturbadores das medições e das respectivas incertezas de medição.

Os procedimentos de calibração desenvolvidos no NQM são, em regra, baseados em normas portuguesas, estrangeiras ou internacionais. Contudo, em casos como o presente, em que a instrumentação foi desenvolvida “*in-house*” para uma finalidade particular, não

existem suportes normativos para a componente metrológica. Neste tipo de casos, o NQM tem vindo a desenvolver processos dedicados de calibração por analogia com a tipologia da instrumentação em causa, com vista a estabelecer um procedimento interno suportado em regras que permitam atingir os aspectos fundamentais de garantia da qualidade das medições. Assim, é efectuada a caracterização metrológica, considerada crítica para assegurar o bom desempenho das medições, a identificação dos padrões de referência adequados, a selecção do método aplicável e das etapas do procedimento experimental. Complementarmente são identificadas as contribuições para a avaliação da incerteza de medição associada aos resultados da calibração e recolhida a informação relevante para a elaboração do certificado de calibração.

O presente documento incide sobre um instrumento de medição que se integra numa cadeia de rastreabilidade específica do LNEC, a qual relaciona directamente a sua qualidade metrológica com a de um transdutor de deslocamento e indicador dedicado, o qual é considerado equipamento de referência rastreado aos padrões primários da grandeza comprimento.

Num contexto mais amplo refira-se que este procedimento faz parte do acervo de cerca de 60 procedimentos de calibração e ensaio metrológico desenvolvidos pelo NQM ao longo da sua existência, os quais contêm indicações pormenorizadas dos diferentes aspectos que suportam os serviços prestados pelo LCAM/LNEC constituindo uma parte importante do Sistema de Gestão (da Qualidade) deste laboratório, acreditado no quadro do Sistema Português da Qualidade.

Refira-se, também, que o interesse da publicação periódica deste tipo de documentos resulta da necessidade de disseminação de conhecimento associado à introdução de novos procedimentos, bem como, da necessidade de introdução de revisões periódicas destes documentos, situação que ocorre neste caso, ditada quer pela evolução dos processos operativos quer pela adopção de requisitos mais exigentes. Esta iniciativa tem como objectivo colateral divulgar informação relevante e actualizada, ainda que de uma forma reservada, aos clientes do LCAM/LNEC, que assim poderão interpretar melhor os resultados das calibrações ou dos ensaios metrológicos realizados.

2 CONTEÚDO DO RELATÓRIO

No presente relatório é divulgado, em Anexo, o Procedimento E3801 designado por “Procedimento de Calibração de Defómetros Unidimensionais” (Versão 2), o qual foi elaborado no seguimento da modificação do método de calibração, tendo sido desenvolvido com o objectivo de efectuar a avaliação de um conjunto de requisitos metrológicos que pretendem assegurar a qualidade do processo de rastreabilidade de defómetros unidimensionais e, conseqüentemente, das medições efectuadas pelas cadeias de medição onde estes se integram.

O procedimento da calibração de defómetros unidimensionais é constituído por um conjunto de secções incluindo:

- uma apresentação introdutória contendo detalhes relativos à colocação e ligações dos extensómetros no corpo do defómetro;
- as operações preparatórias que devem anteceder a realização do ensaio de avaliação do nível de exactidão da grandeza mensurável (por exemplo, a inspecção visual e a montagem experimental do defómetro na instalação de calibração);
- o procedimento de calibração visando a avaliação dos desvios de calibração observados obtidos pela diferença entre os valores de medição do padrão de referência e as indicações produzidas pela cadeia de medição do defómetro;
- a avaliação das incertezas de medição tendo em conta as contribuições associadas ao padrão, ao sistema de medição a calibrar e ao método utilizado;
- e o conteúdo informativo do certificado de calibração.

A concretização dos ensaios de calibração de defómetros unidimensionais é efectuada nas instalações do LCAM/LNEC com recurso a padrões de referência deste laboratório, rastreados aos padrões primários das respectivas grandezas assegurando o cumprimento de requisitos normativos aplicáveis.

VISTOS

O Director do CIC,



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Álvaro Silva Ribeiro

Lic.º em Física Tecnológica, Doutor
Investigador Auxiliar, Chefe do NQM



Luís Filipe Lages Martins

Lic.º em Engenharia Mecânica
Bolsheiro de Doutoramento



João Onofre Benevente

Eng.º Técnico
Técnico Superior

ANEXO 1

Procedimento de Calibração de Defómetros Unidimensionais (Versão 2)



Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Central de Apoio Metrológico

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E3801 (VERS. 2)

Defómetros unidimensionais

INDICE

1 – ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA	3
2 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO	4
3 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO	5
4 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	5
4.1 - INTRODUÇÃO.....	5
4.2 - CAPACIDADE DO LCAM PARA CALIBRAR UM DEFÓRMETRO UNIDIMENSIONAL	6
4.3 – INSPECÇÃO VISUAL E PREPARAÇÃO DA CALIBRAÇÃO	6
4.4 – MONTAGEM EXPERIMENTAL	7
4.5 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	8
4.6 - DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS E DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	9
4.7 - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO	9
5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	10
 ANEXO 1 – Localização dos defómetros no LFJ e correspondência entre defómetros e fios condutores.....	 11
ANEXO 2 – Modelos matemáticos e cálculo de incertezas de medição	12

RESERVADO

1 – ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA

O Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM) executa o ensaio de calibração de defómetros unidimensionais na gama de medição de deslocamento compreendida entre 0 mm e 4 mm e cuja resolução não ultrapasse 0,001 mm.

Estes elementos constituem transdutores de medição de deslocamento incorporados no equipamento de medição LFJ – *Large Flat Jack* – utilizado em ensaios em campo para determinação da deformabilidade de maciços rochosos.

O defómetro unidimensional é formado por duas lâminas metálicas inclinadas relativamente ao corpo central através do qual se procede à sua fixação no sistema LFJ (*vide* Figura 1). Cada face superior e inferior das lâminas metálicas possui um extensómetro eléctrico colado à sua superfície. As ligações eléctricas entre os quatro extensómetros são efectuadas de modo a garantir uma disposição em ponte de Wheatstone na configuração de ponte completa.

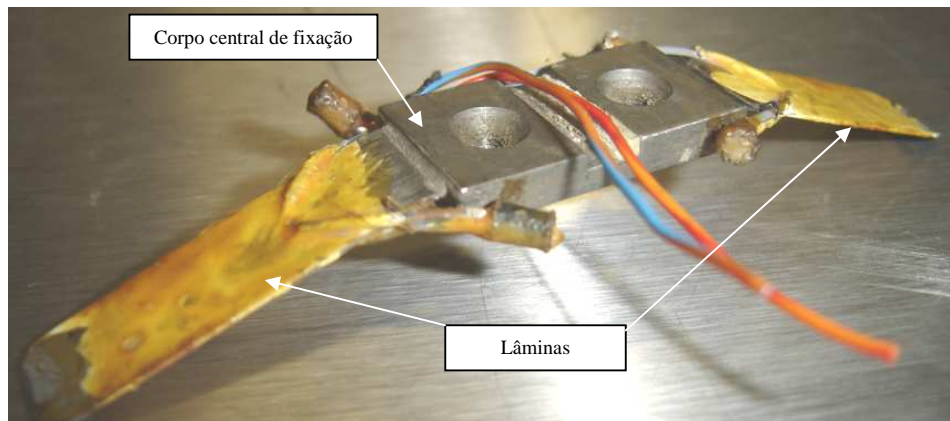


Figura 1 – Defómetro unidimensional.

No âmbito da realização deste ensaio de calibração, o LCAM dispõe dos seguintes padrões de medição:

- calibrador de defómetros constituído por uma coluna de medição vertical associada a um transdutor de deslocamento e indicador dedicado, este último rastreado ao padrão primário da grandeza comprimento;
- multímetros eléctricos rastreados aos padrões primários das grandezas tensão eléctrica e resistência eléctrica.

2 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O princípio de medição consiste na determinação da variação da tensão eléctrica do circuito eléctrico – formado por quatro extensómetros dispostos em ponte de Wheatstone no defómetro – quando sujeito a deformação em regime elástico.

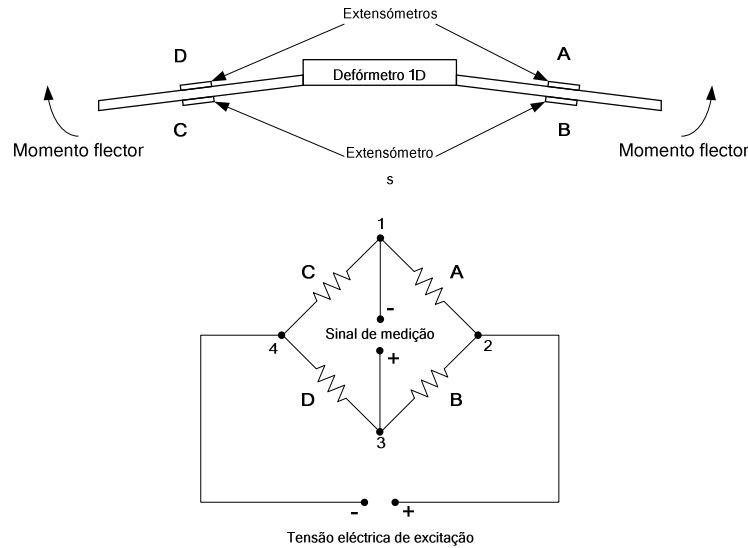


Figura 2 – Esquema de identificação dos extensómetros e nós no circuito eléctrico da ponte de Wheatstone.

A ponte de Wheatstone pode ser concretizada em diferentes configurações, sendo adoptada, no presente caso, a configuração de ponte completa, a qual corresponde à situação em que todas as resistências eléctricas existentes nos quatro braços da ponte são variáveis (encontra-se um extensómetro em cada um dos braços da ponte).

Nestas circunstâncias a expressão que relaciona a tensão eléctrica de excitação, V_i , com a tensão eléctrica de saída (sinal de medição), V_o , e com as deformações observadas nos quatro extensómetros (ϵ_A , ϵ_B , ϵ_C , ϵ_D) é

$$V_o = \frac{k \cdot V_i}{4} \cdot (-\epsilon_C + \epsilon_A + \epsilon_D - \epsilon_B). \quad (1)$$

Uma vez que a deformação do suporte faz com que, em qualquer circunstância, dois dos extensómetros instalados nas lâminas do defómetro possuam uma reacção em tracção e os outros dois em compressão, a expressão anterior simplifica-se da seguinte forma:

$$V_o = \frac{k \cdot V_i}{4} \cdot (4\epsilon) = k \cdot V_i \cdot \epsilon. \quad (2)$$

Assim, a determinação do valor da constante k resulta da expressão que se segue.

$$k = \frac{\left(\frac{V_o}{V_i}\right)}{\varepsilon} = \frac{V_o}{\varepsilon \cdot V_i}. \quad (3)$$

A aplicação do defómetro reflecte uma relação entre a imposição de um deslocamento de referência (grandeza de entrada) aplicado, z , a conseqüente extensão (grandeza intermédia), ε , e a variação de tensão eléctrica de saída, $\Delta V/V$.

Considerando a cadeia de medição completa constituída pelo defómetro (incluindo os quatro extensómetros numa configuração de ponte completa), a fonte de excitação e a unidade de transdução e leitura, a sua calibração traduz-se numa avaliação da constante, k_{lv} , que relaciona a grandeza de entrada, z , com a grandeza de saída, $(\Delta V/V)$.

$$k_{lv} = \frac{z}{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)}. \quad (4)$$

3 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

O método de calibração é baseado no estabelecimento de uma relação matemática entre os valores da grandeza deslocamento provenientes do padrão de referência – transdutor de deslocamento – e os correspondentes valores da grandeza tensão eléctrica medidos usando a ponte de Wheatstone instalada no corpo do defómetro, a qual é excitada por uma tensão eléctrica de entrada aproximadamente constante. Pretende-se determinar a relação entre o deslocamento e a variação de tensão eléctrica relativa (4) traduzida num *coeficiente deslocamento-tensão eléctrica do defómetro*, k_{lv} .

4 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

4.1 - Introdução

Apresenta-se, em seguida, um procedimento interno de calibração de defómetros unidimensionais elaborado pelo LCAM.

4.2 - Capacidade do LCAM para calibrar um defómetro unidimensional

Quando solicitado para calibrar um defómetro unidimensional, o LCAM avaliará a sua capacidade para efectuar a operação tendo em conta a gama de medição (compreendida entre 0 mm e 4 mm), a resolução do transdutor de deslocamento (0,1 μm) e o seu nível de exactidão. Será, também, avaliado o nível de exactidão e a resolução dos multímetros utilizados na medição das mensurandas de natureza eléctrica (tensão eléctrica e resistência eléctrica).

4.3 – Inspeção visual e preparação da calibração

O equipamento a calibrar, os padrões de referência deverão ser colocados previamente (24 horas antes da realização da calibração) nas instalações laboratoriais, de forma a estabelecer-se um equilíbrio térmico dos mesmos próximo da temperatura de referência.

A observação do aspecto exterior do defómetro deve permitir a anotação de eventuais ocorrências indicadas em seguida:

- *degradação do isolamento eléctrico, em particular, nas ligações entre extensómetros, na região de colagem de extensómetros e nos fios condutores;*
- *deformação plástica excessiva dos fios condutores;*
- *excesso de isolamento eléctrico na região de colagem dos extensómetros (não devem existir pontos de contacto na lâmina durante a sua flexão, excepto nas saliências metálicas existentes para esse efeito na extremidade da lâmina).*

A preparação do ensaio consiste na identificação da configuração da ponte de Wheatstone do defómetro mediante a medição da resistência eléctrica entre os terminais dos quatro fios condutores (com revestimentos de cores diferenciadas, *vide* Anexo 1) e a verificação das relações matemáticas $R_{13} = R_{24} = R$ e $R_{12} = R_{23} = R_{34} = R_{41} = \frac{3}{4}R$, onde R corresponde à resistência eléctrica nominal individual (aproximadamente, 350 Ω) dos extensómetros – *vide* Figura 2 – que constituem o defómetro sujeito a calibração.

4.4 – Montagem experimental

A montagem experimental (a efectuar no contexto da operação de calibração de um defómetro unidimensional, *vide* Figuras 3 e 4a a 4c) inclui as seguintes operações:

- a. *posicionar o defómetro entre a base rectificada e o corpo móvel da coluna, de forma a garantir um correcto alinhamento com o seu eixo vertical de simetria; a superfície do corpo central do defómetro deverá encontrar-se em contacto completo com a superfície do corpo móvel mencionado;*
- b. *efectuar as seguintes ligações eléctricas de acordo com as instruções seguintes e o disposto no Anexo 1, onde constam a identificação dos fios condutores e a respectiva polaridade eléctrica:*
 - b1. *terminais do defómetro à entrada em tensão eléctrica do multímetro 1;*
 - b2. *terminais do defómetro à fonte de excitação eléctrica;*
 - b3. *multímetro 2 à fonte de excitação eléctrica.*
- c. *ligar todos os equipamentos eléctricos e regular a tensão eléctrica de saída da fonte de excitação para um valor próximo de 5,000 0 V (DC);*
- d. *aguardar pelo menos uma hora antes de executar o ensaio de calibração.*

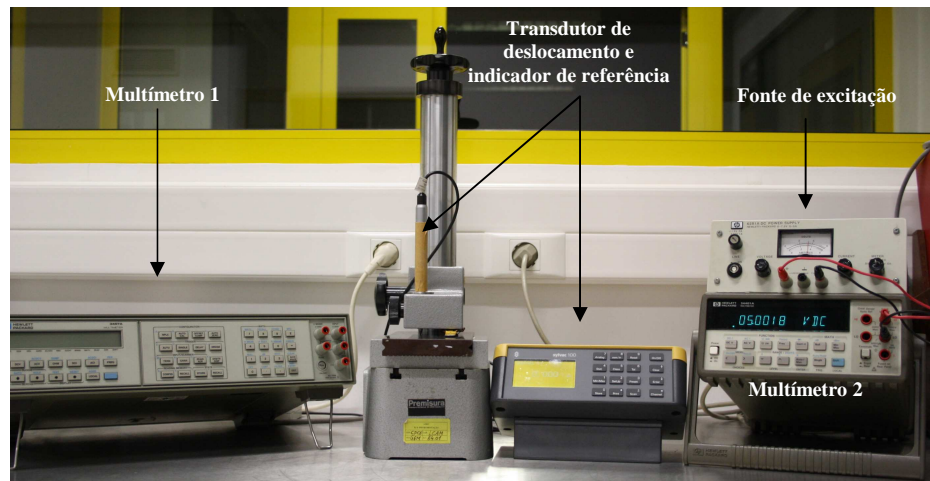
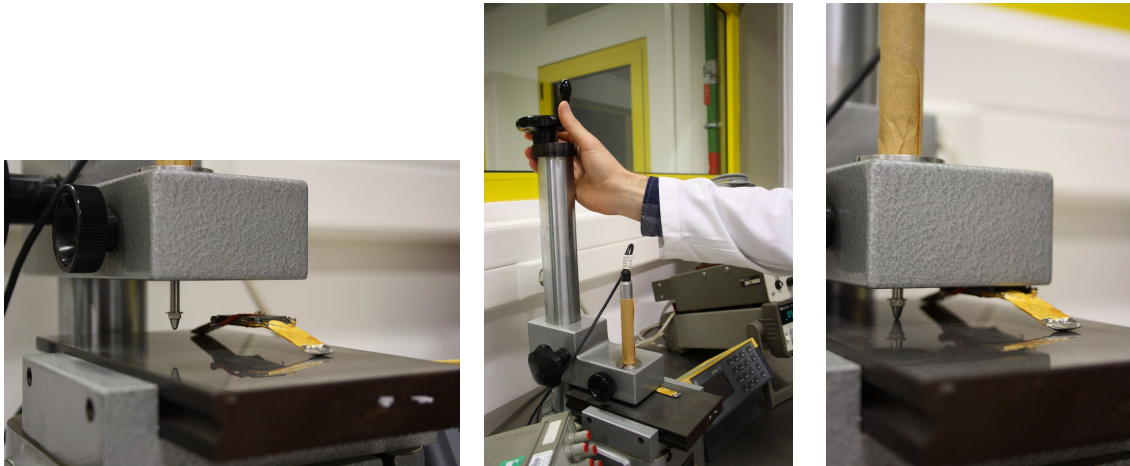


Figura 3 – Montagem experimental do ensaio de calibração de defómetros unidimensionais.



Figuras 4a, 4b e 4c – Detalhes da montagem experimental em posição livre, da deslocação do corpo móvel e transdutor e da operação de posicionamento inicial para a calibração de defómetros.

4.5 - Procedimento de calibração

A realização do ensaio de calibração de defómetros requer a manutenção da temperatura e da humidade relativa da instalação laboratorial nos intervalos $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 15) \% \text{ hr}$, respectivamente.

O procedimento de calibração envolve as seguintes tarefas e operações:

- a. deslocar o corpo móvel da coluna no sentido descendente assegurando a compressão máxima admissível do defómetro (corresponde à posição em que as suas lâminas metálicas possuem um ângulo de abertura próximo dos 180°); efectuar o zero no indicador associado ao transdutor de deslocamento;*
- b. registar o valor da tensão eléctrica fornecida pela fonte de excitação ao defómetro após se verificar que a estabilidade do sinal é igual ou inferior a $\pm 0,000 2 \text{ V}$ (critério de aceitação); caso este valor de estabilidade não seja atingido, dever-se-á procurar eliminar eventuais fontes de ruído eléctrico, em particular, ligações eléctricas deficientes ou interferências electromagnéticas de componentes eléctricos (nomeadamente, provenientes da bancada e de equipamentos próximos);*
- c. promover um deslocamento de 0,500 mm do corpo móvel da coluna no sentido ascendente;*

- d. registar a leitura da tensão eléctrica do circuito eléctrico do defómetro; a estabilidade do valor lido deverá ser igual ou inferior a $\pm 0,01 \text{ mV}^1$;
- e. repetir a operação descrita em c. e d. efectuando incrementos sucessivos de 0,500 mm até se atingir o deslocamento máximo pretendido de 4,000 mm do corpo móvel da coluna desde da posição de referência referida em a.;
- f. repetir os pontos a. a e. quatro vezes.

4.6 - Determinação dos resultados e da incerteza de medição

Os resultados do ensaio de calibração do defómetro deverão incluir:

- o valor médio da tensão eléctrica no defómetro em cada patamar de ensaio;
- os coeficientes lineares da relação entre o deslocamento e a tensão eléctrica no defómetro e respectiva incerteza de medição e coeficiente de correlação;
- o valor residual da tensão eléctrica no defómetro em cada patamar de ensaio;
- o valor médio do coeficiente deslocamento-tensão eléctrica do defómetro.

No Anexo 2 do presente documento são apresentados os modelos matemáticos aplicados na determinação das estimativas das variáveis acima mencionadas e das respectivas incertezas de medição [2, 3].

4.7 - Certificado de calibração

Preencher o certificado de calibração de acordo com [2, 3] referindo:

- a identificação do defómetro sujeito a ensaio de calibração;
- a identificação do equipamento de calibração utilizado;
- a temperatura e a humidade relativa ambientais;
- a identificação da ponte de Wheatstone do defómetro calibrado e respectivos valores de resistência eléctrica medidos;
- a tensão eléctrica aplicada ao defómetro;

¹ Salienta-se que, o intervalo de deslocamento inicial do defómetro compreendido entre 0,000 mm e 0,500 mm corresponde a um regime transiente de tensão eléctrica em resultado da alteração da magnitude das componentes da força de reacção que actua em ambas as lâminas metálicas durante o referido intervalo de deslocamento.

- os valores que compõem o quadro de resultados (valores de referência de deslocamento e valores médios de tensão eléctrica lidos no defómetro);
- os coeficientes da relação linear entre a tensão eléctrica no defómetro e o deslocamento;
- os valores residuais de tensão eléctrica no defómetro;
- o valor médio do coeficiente deslocamento-tensão eléctrica do defómetro;
- a incerteza de medição expandida [2, 3] para um intervalo de confiança de 95%.

5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- [1] “Vocabulário Internacional de Metrologia”, 3ª Edição, Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Novembro de 2008.
- [2] “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, Genève (Suíça): International Organisation for Standardisation (ISO), 1995.
- [3] “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração”, Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1996.
- [4] Mood, A., Graybill, F. e Boes, D., “Introduction to the Theory of Statistics”, 3ª Edição, Singapura: Mc-Graw Hill, 1974.

RESERVADO

ANEXO 1 – Localização dos defórmómetros no LFJ e correspondência entre defórmómetros e fios condutores

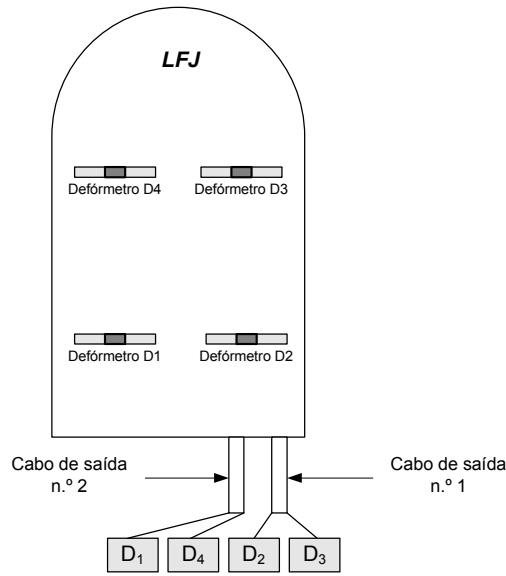


Figura 5 – Representação esquemática da localização dos defórmómetros no LFJ e respectiva cablagem.

Tabela 1 – Correspondência entre defórmómetros e fios condutores.

Cabo de saída		Defórmómetro			
N.º	Condutor	N.º	Cor base	Função	Condutor
1	1	D2	Branco	Excitação +	BRANCO
	2			Sinal -	BRANCO + AZUL
	3			Sinal +	BRANCO + CINZENTO
	4			Excitação -	CINZENTO
	5	D3	Castanho	Excitação -	CINZENTO
	6			Sinal +	CASTANHO + VERDE
	7			Sinal -	CASTANHO + AZUL
2	1	D4	Laranja	Excitação +	LARANJA + VERMELHO
	2			Sinal -	LARANJA + AZUL
	3			Sinal +	LARANJA + VERDE
	4			Excitação -	CINZENTO
	5	D1	Azul	Excitação -	CINZENTO
	6			Sinal +	AZUL + VERDE
	7			Sinal -	AZUL
				Excitação +	AZUL + VERMELHO

ANEXO 2 – Modelos matemáticos e cálculo de incertezas de medição

O coeficiente deslocação-tensão eléctrica do defómetro, k_{lv} , corresponde ao valor médio dos coeficientes parciais deslocação-tensão eléctrica obtidos entre patamares consecutivos de ensaio, isto é,

$$k_{lv} = \frac{\sum_{k=1}^m k_{lv_k}}{m} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\Delta x_k \cdot V}{\Delta V_k}}{m}, \quad (1)$$

onde V corresponde à tensão eléctrica aplicada ao defómetro e Δz_k e ΔV_k são, respectivamente, o deslocação e a variação de tensão eléctrica no defómetro entre patamares consecutivos de ensaio.

A incerteza de medição associada a k_{lv} apresenta duas componentes fundamentais – o desvio-padrão experimental da média e o desvio-padrão experimental da amostra – que, por aplicação da Lei de Propagação de Incertezas [2, 3], permitem obter a expressão

$$u(k_{lv}) = \sqrt{\frac{u^2(k_{lv_k})}{m} + s^2(k_{lv_k})}, \quad (2)$$

onde $u(k_{lv_k})$ é a incerteza de medição majorada dos coeficientes parciais deslocação-tensão eléctrica, $s(k_{lv_k})$ é o desvio-padrão experimental da amostra de k_{lv_k} e $m = n - 1$.

Por sua vez, a incerteza de medição dos coeficientes parciais deslocação-tensão eléctrica é determinada pela aplicação da Lei de Propagação de Incertezas [2, 3], ou seja,

$$u(k_{lv_k}) = \sqrt{c_{\Delta z}^2 u^2(\Delta z) + c_V^2 u^2(V) + c_{\Delta V}^2 u^2(\Delta V)}, \quad (3)$$

onde os coeficientes de sensibilidade são iguais a

$$c_{\Delta z} = \frac{V}{\Delta V}, \quad (4)$$

$$c_V = \frac{\Delta z}{\Delta V}, \quad (5)$$

$$c_{\Delta V} = -\frac{\Delta z \cdot V}{\Delta V^2}. \quad (6)$$

