



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO NA UNIDADE OPERATIVA DE PAVIMENTOS E MATERIAIS PARA INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES DO LNEC – ENSAIOS E METROLOGIA

Ensaio para medição de deflexões com o defletómetro de impacto

Departamento de Transportes do LNEC, I. P.

Lisboa • novembro de 2017

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 378/2017 – CIC/NQM

Título

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO NA UNIDADE OPERATIVA DE PAVIMENTOS E MATERIAIS PARA INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES DO LNEC – ENSAIOS E METROLOGIA

Ensaio para medição de deflexões com o defletómetro de impacto

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 378/2017

Proc. 0904/112/19727

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO NA UNIDADE OPERATIVA DE PAVIMENTOS E MATERIAIS PARA INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES DO LNEC – ENSAIOS E METROLOGIA

Ensaio para medição de deflexões com o defletómetro de impacto

Resumo

Este relatório descreve o processo de avaliação de incertezas de medição do ensaio para medição de deflexões com o defletómetro de impacto, realizado pela Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transportes do LNEC – Ensaios e Metrologia (LNEC-EM | UPAVMAT). Este documento contém uma descrição sumária do ensaio normalizado estudado (ASTM 4694-09) e do respetivo equipamento de ensaio, bem como da sua caracterização metrológica. Contém, igualmente, a avaliação da incerteza de medição da deflexão suportada na aplicação do método ISO-GUM e na quantificação fundamentada das componentes de incerteza identificadas para esta grandeza.

Palavras-chave: Pavimento / Defletómetro de impacto / Deflexão / Incerteza de medição

EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY AT THE PAVEMENTS AND MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURES LABORATORY OF LNEC – TESTING AND METROLOGY

Deflections measurement test with the Falling Weight Deflectometer (FWD)

Abstract

This report describes the procedure to the evaluation of measurement uncertainty related to deflections measurement test with a Falling Weight Deflectometer (FWD), performed by the Pavements and Materials for Transport Infrastructures Laboratory of LNEC – Testing and Metrology (LNEC-EM | UPAVMAT). This document contains a brief description of the studied standard test (ASTM 4694-09) and of the testing equipment and its metrological characterization. It also contains the evaluation of the deflection measurement uncertainty, based on the use of the ISO-GUM method and on the quantified uncertainty components related to this quantity.

Keywords: Pavement / Falling weight deflectometer / Deflection / Measurement uncertainty

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO NA UNIDADE OPERATIVA DE PAVIMENTOS E MATERIAIS PARA INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES DO LNEC – ENSAIOS E METROLOGIA

Ensaio para medição de deflexões com o defletómetro de impacto

Índice

1	Introdução	1
2	Ensaio para medição de deflexões em pavimentos com o defletómetro de impacto.....	3
2.1	Introdução	3
2.2	Descrição simplificada do ensaio e do equipamento dedicado.....	4
2.3	Caraterização metrológica do equipamento de ensaio	6
3	Avaliação da incerteza de medição da deflexão.....	10
3.1	Formulação probabilística das componentes de incerteza	10
3.1.1	Padrão de referência para calibração dos geofones.....	10
3.1.2	Deriva instrumental	10
3.1.3	Repetibilidade a curto prazo	11
3.1.4	Desvios relativos entre geofones.....	11
3.1.5	Linearidade	12
3.1.6	Desvios sistemáticos do valor de pico da deflexão	13
3.1.7	Arredondamento do valor de pico da deflexão	13
3.2	Propagação das incertezas de medição.....	14
4	Considerações finais	15
	Referências bibliográficas	16
	ANEXO	17

Índice de figuras

Figura 2.1 – Veículo para ensaio de pavimento aeroportuário com defletómetro de impacto.....	3
Figura 2.2 – Exemplo de um registo temporal das medições de deflexão num pavimento rodoviário	5
Figura 2.3 – Célula de carga do padrão de força com acessórios para ligação à placa de carga	6
Figura 2.4 – Geofone do defletómetro de impacto da marca Carl Bro	7
Figura 2.5 – Resposta em frequência de geofone não-compensado	7
Figura 2.6 – Compensação por filtragem	7
Figura 2.7 – Resposta em frequência de geofone com filtro de compensação.....	7
Figura 2.8 – Resposta em frequência de geofone com filtro de compensação não adequado.....	7
Figura 2.9 – Exemplo de resultados do ensaio de linearidade de um geofone (tempo de subida vs. desvio relativo)	9

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Especificações técnicas do defletómetro de impacto do LNEC-EM UPVMAT	4
Quadro 2.2 – Exemplo de valores de pico de deflexão medidos num ponto de ensaio de um pavimento rodoviário.....	5
Quadro 2.3 – Frequências de corte dos geofones do defletómetro de impacto	8
Quadro 2.4 – Parametrização linear dos geofones.....	8
Quadro 3.1 – Deriva das estimativas de declive dos geofones	10
Quadro 3.2 – Resultados dos ensaios de repetibilidade a curto prazo	11
Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios da torre de empilhamento com o defletómetro de impacto.....	12
Quadro 3.4 – Resultados de ensaio de linearidade	12
Quadro 3.5 – Resultados de ensaio de calibração	13
Quadro 3.6 – Balanço de incertezas de medição da deflexão com recurso a um defletómetro de impacto.....	14
Quadro A.1 – Resultados experimentais das calibrações da cadeia de medição de força	19
Quadro A.2 – Análise da deriva instrumental da medição de força.....	20
Quadro A.3 – Balanço de incertezas de medição da força.....	20

1 | Introdução

No Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) coexistem diversos laboratórios que desenvolvem uma significativa atividade experimental incorporando, nos ensaios desenvolvidos, a medição de grandezas mensuráveis e, conseqüentemente, os requisitos de qualidade para a expressão dos resultados dos resultados dessa medição (as suas estimativas e das respetivas incertezas associadas).

O Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM), inserido no Centro de Instrumentação Científica (CIC), é um setor do LNEC com diversas competências, nomeadamente, promover estudos de caracterização metrológica, quer relacionados com a calibração e ensaio de instrumentação científica, quer com o desempenho dos sistemas de medição.

No que respeita aos ensaios desenvolvidos por outros setores do LNEC, a colaboração entre o NQM e esses setores é traduzida na concretização de estudos de caracterização metrológica onde se insere, com particular destaque, a avaliação das incertezas de medição. O presente estudo, relacionado com o ensaio para medição de deflexões em pavimentos com o defletómetro de impacto e executado pela Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transporte do LNEC – Ensaios e Metrologia (LNEC-EM | UPAVMAT), foi realizado por solicitação do Núcleo de Infraestruturas de Transportes do Departamento de Transportes do LNEC. Atendendo a que este laboratório se encontra integrado no Sistema de Gestão da Qualidade do LNEC, este estudo permite, em particular, cumprir um requisito normativo que decorre da aplicação da norma de referência (NP EN ISO/IEC 17025:2005), a qual contém o conjunto de requisitos gerais para assegurar a competência dos laboratórios de calibração e de ensaio acreditados.

A declaração da incerteza de medição constitui um dos requisitos normativos aplicáveis aos ensaios laboratoriais, correspondendo a um elemento de quantificação da qualidade das medições realizadas. Faz-se notar que este parâmetro adquire uma relevância particular ao permitir a comparação entre medições obtidas em ensaios laboratoriais realizados por outras entidades.

Neste documento, é descrito o processo de avaliação das incertezas de medição no ensaio para medição de deflexões em pavimentos com o defletómetro de impacto, com base na actividade laboratorial desenvolvida pelo LNEC-EM | UPAVMAT no âmbito da caracterização experimental de pavimentos de infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias.

O Capítulo 2 apresenta uma descrição breve do ensaio estudado no que se refere ao seu objetivo, método, equipamento e procedimento de ensaio, dando-se particular destaque à caracterização metrológica do equipamento utilizado no ensaio. Por sua vez, o Capítulo 3 é dedicado à caracterização probabilística da grandeza mensurável de interesse – a deflexão – a qual suporta a elaboração da respetiva tabela de balanço de incertezas pelo método ISO-GUM (JCGM 100:2008), atendendo à linearidade que caracteriza o processo de medição desta grandeza. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as

considerações finais associadas ao estudo realizado, apresentando-se no Anexo I o balanço de incertezas de medição associado à grandeza força.

Salienta-se que, de acordo com o procedimento de ensaio adotado pelo LNEC-EM | UPAVMAT, o valor de força mencionado no boletim de ensaio corresponde a um valor nominal, tornando esta medição menos significativa do que a medição da deflexão, justificando que o presente documento esteja centrado na avaliação da incerteza de medição da deflexão. No entanto, o balanço de incerteza de medição da força, apresentado no Anexo I, suporta a análise do cumprimento do requisito normativo de exatidão exigido para a medição desta grandeza de influência.

2 | Ensaio para medição de deflexões em pavimentos com o defletómetro de impacto

2.1 Introdução

As atividades de ensaio de pavimentos rodoviários e aeroportuários contribuem significativamente para a garantia da segurança de pessoas e bens em redes de transportes, apoiando os processos de decisão das entidades associadas ao seu projecto, construção, manutenção e gestão. Neste contexto, destaca-se a existência de vários métodos de ensaio com enquadramento normativo internacional, os quais contribuem para a melhoria do conhecimento sobre os pavimentos ensaiados, nomeadamente, do seu desempenho estrutural e da sua caracterização experimental.

A medição de deflexões com recurso a um defletómetro de impacto¹ (ASTM D4694-09; ASTM D4695-03) corresponde a um método normalizado de ensaio, onde um impulso de força é aplicado na superfície do pavimento e cuja conseqüente deflexão vertical é medida em vários pontos radialmente afastados entre si, a partir do eixo de aplicação de carga. O impulso de força é gerado pela queda de um peso sobre um sistema de amortecimento, sendo transmitido através de uma placa em repouso colocada sobre a superfície do pavimento. Em regra, o dispositivo de ensaio é montado num veículo ou rebocado por este, conforme se mostra na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Veículo para ensaio de pavimento aeroportuário com defletómetro de impacto

O defletómetro de impacto é um dos equipamentos de ensaio mais utilizados na Europa e nos E.U.A., para a avaliação estrutural de pavimentos mediante ensaio do tipo não-destrutivo, permitindo uma avaliação das camadas diferenciadas que compõem a estrutura do pavimento. Atualmente, este tipo de ensaio apresenta uma importância acrescida no contexto da reabilitação de pavimentos, nomeadamente, no estudo experimental de soluções de reforço operacionais (Fontul; 2004).

¹ Na terminologia anglo-saxónica, este dispositivo de aplicação de impulso de força em pavimentos por queda de peso é designado habitualmente por FWD – Falling Weight Deflectometer.

As duas principais grandezas medidas neste ensaio são a deflexão e a força, as quais constituem grandezas dinâmicas com requisitos metrológicos normativos dedicados, às quais se juntam as medições das grandezas de influência: temperatura do ar e do pavimento. O cumprimento destes requisitos implica que se estabeleça a rastreabilidade das cadeias de medição do equipamento de ensaio ao Sistema Internacional (SI) mediante a sua calibração, e que faça uma avaliação rigorosa e fundamentada das incertezas de medição.

2.2 Descrição simplificada do ensaio e do equipamento dedicado

A realização do ensaio para medição de deflexões em pavimentos implica o recurso a um defletómetro de impacto, existindo no mercado equipamentos de ensaio de diferentes fabricantes (por exemplo, JILS, Carl Bro, Dynatest®, KUAB). No caso do LNEC-EM | UPAVMAT é utilizado o defletómetro de impacto da marca Carl Bro, modelo PRI 2100 FWD, versão *trailer*, cujas especificações técnicas (Carl Bro; 2004) se resume no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Especificações técnicas do defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT

Dados gerais			
Fabricante	Carl Bro	Modelo	PRI 2100 FWD
Versão	Trailer	Dimensões	4,30 m x 1,84 m x 1,30 m
Massa	1180 kg	Número de eixos	2
Alimentação elétrica	Gerador de 24 V (DC)	N.º de pontos de ensaio	65/h
N.º mínimo de operadores	1	Diâmetro da placa de carga	300 mm ou 450 mm
Medição de deflexão			
Tipo de sensor	Geofone	Quantidade	9
Exatidão	2%	Resolução	1 µm
Alcance	2200 µm	Afastamento radial máximo	2500 mm
Medição de força			
Intervalo de medição	7 kN a 250 kN	Duração de impulso	20 ms a 30 ms
Forma do impulso	½ seno	Tempo de subida	10 ms (aproximadamente)
Exatidão	2%	Resolução	0,01 kN
Medição de temperatura			
Tipo de sensor	Resistivo (Pt 100 Ω)	Número de sensores	3 (superfície, ar, manual)
Intervalo de medição	0 °C a 45 °C	Resolução	0,1 °C
Exatidão	≤ 1%	---	---
Medição da distância			
Exatidão	≤ 0,1%	---	---
Sistema de aquisição			
Intervalo de amostragem	60 ms a 120 ms	Resolução	16 bits
Frequência	40 kHz	---	---

No ensaio em causa, o defletómetro de impacto é colocado sobre o pavimento em observação, para o qual se define a direção e o sentido de circulação, o número de pontos de ensaio e o seu distanciamento mútuo. Em cada ponto de ensaio é efetuada a descida de uma placa de carga e dos sensores de deflexão sobre a superfície de ensaio, a qual deve-se apresentar livre de quaisquer

partículas ou detritos rochosos. A estabilidade e firmeza da superfície de ensaio são essenciais para uma adequada avaliação da sua repetibilidade. Pelo menos três sequências de carga são aplicadas, uma para assegurar um contacto adequado da placa sobre a superfície do pavimento e as restantes duas para avaliar a repetibilidade do ensaio.

No caso do procedimento usando o defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT são utilizados nove geofones, distribuídos radialmente em torno do eixo de aplicação de carga, que resulta da elevação e posterior queda de um peso. Esta ação mecânica sobre o pavimento origina um impulso de força com uma forma aproximada de meia onda de seno e um valor de pico de força compreendido entre 45 kN e 250 kN, dependendo das características do pavimento ensaiado, em regra, mais reduzida em pavimentos rodoviários e mais elevada em pavimento aeroportuários.

Quando ocorre a queda do peso sobre a superfície ensaiada, os sensores de deflexão do equipamento de ensaio medem o movimento vertical resultante, enquanto a célula de carga instalada sobre a placa mede o correspondente impulso de força aplicado.

No Quadro 2.2, é apresentado um exemplo dos valores de pico de deflexão obtidos num ensaio experimental realizado pelo LNEC-EM | UPAVMAT num pavimento rodoviário. A Figura 2.2 apresenta o respetivo registo temporal das medições de deflexão no intervalo de amostragem.

Quadro 2.2 – Exemplo de valores de pico de deflexão medidos num ponto de ensaio de um pavimento rodoviário

Identificação do geofone	Posição radial / cm	Valor de pico de deflexão / μm	Identificação do geofone	Posição radial / cm	Valor de pico de deflexão / μm
1	0	60	6	120	5
2	30	33	7	150	4
3	45	20	8	180	3
4	60	12	9	210	2
5	90	6	---	---	---

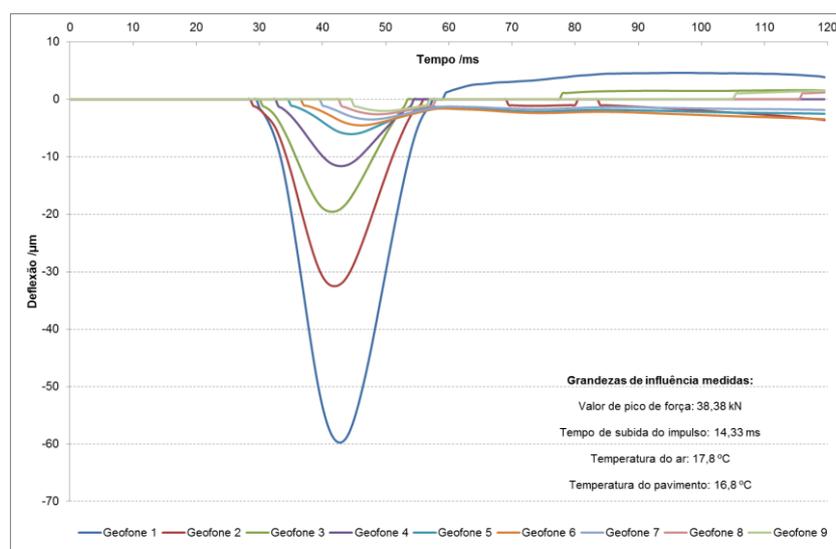


Figura 2.2 – Exemplo de um registo temporal das medições de deflexão num pavimento rodoviário

2.3 Caracterização metrológica do equipamento de ensaio

No contexto da qualidade da medição, a caracterização metrológica do defletómetro de impacto visa a obtenção de conhecimento acerca do seu desempenho na observação das mensurandas, nomeadamente, no caso em estudo, das grandezas deflexão e força. O conhecimento adquirido é essencial para a avaliação da incerteza de medição das grandezas observáveis, determinando a adequação do equipamento ao uso pretendido. De facto, de acordo com a norma de ensaio (ASTM D4694-09), o defletómetro de impacto utilizado deverá cumprir os seguintes requisitos metrológicos:

- exatidão associada à medição de deflexão e força: 2%;
- resolução da medição de deflexão e força: 1 μm e 0,2 kN, respetivamente;
- repetibilidade associada à medição de deflexão: 2 μm .

A calibração periódica das cadeias de medição do defletómetro de impacto contribui significativamente para o conhecimento do seu desempenho metrológico e a consequente avaliação do cumprimento dos requisitos normativos acima mencionados. Em acréscimo, é igualmente possível estabelecer a rastreabilidade ao SI, sendo quantificados os desvios e as incertezas de medição do equipamento assegurando, deste modo, a confiança e a comparabilidade dos resultados das medições com os de outras entidades que promovam a medição de deflexões em pavimentos rodoviários e aeroportuários em condições comparáveis.

No caso da cadeia de medição de força, a calibração é suportada no recurso a um padrão de força de referência rastreado ao SI (Irwin; 2011) (*vide* Figura 2.3), composto por uma célula de carga e uma unidade de leitura dedicada, o qual é mecanicamente acoplado à placa de carga do defletómetro de impacto, garantindo-se a necessária axialidade relativamente ao eixo de aplicação de força.



Figura 2.3 – Célula de carga do padrão de força com acessórios para ligação à placa de carga

Torna-se assim possível a obtenção, em simultâneo, de valores de força aplicada por queda de peso, quer através do padrão de referência, quer através da cadeia de medição de força do equipamento de ensaio. Neste caso, os pontos de calibração são regularmente distribuídos pelo intervalo de medição de força e obtidos com base em diferentes alturas de queda de peso no defletómetro de impacto. A repetibilidade associada a cada ponto de calibração é avaliada pela repetição, pelo menos uma vez, do processo de queda de peso sobre a placa de carga.

A calibração individual das cadeias de medição de deflexão, tendo o geofone como elemento sensorial no caso do defletómetro de impacto do LNEC – EM | UPAVMAT (Irwin; 2011) (*vide* Figura 2.4), decorre num gerador de vibrações ou *shaker*, o qual inclui um padrão de medição de deslocamento (inclui, em regra, um sensor de posicionamento linear do tipo LVDT), rastreado ao SI. Este dispositivo de ensaio dinâmico permite excitar, um modo de acoplamento, o geofone e o padrão de medição de deslocamento no intervalo de medição (0 μ m e 2200 μ m) e nas frequências de interesse (0,2 Hz e 450 Hz).



Figura 2.4 – Geofone do defletómetro de impacto da marca Carl Bro

Faz-se notar que a resposta em frequência dos geofones é não-linear num intervalo reduzido compreendido, aproximadamente, entre 0,2 Hz e 7 Hz (SM-6; 1999). Este facto, justifica que se introduza um processo de compensação por filtragem com a adição de filtros dedicados, os quais apresentam uma frequência natural igual à frequência de corte individual de cada geofone e uma resposta dinâmica simétrica à resposta do geofone não-compensado, conforme ilustrado nas Figuras 2.5 a 2.8 (Clemen; 1998).

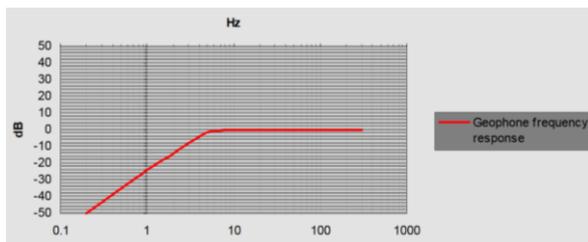


Figura 2.5 – Resposta em frequência de geofone não-compensado

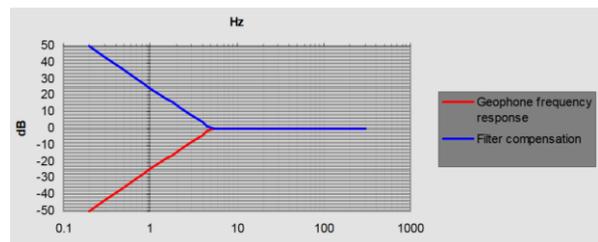


Figura 2.6 – Compensação por filtragem

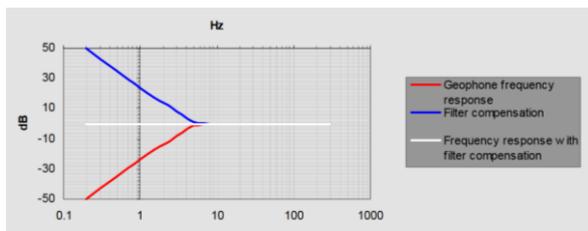


Figura 2.7 – Resposta em frequência de geofone com filtro de compensação

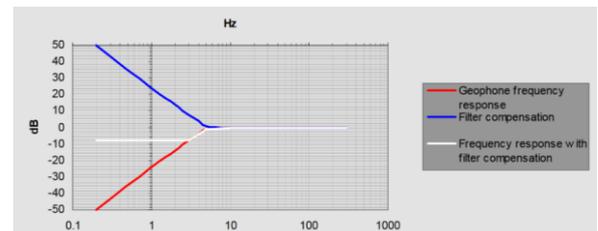


Figura 2.8 – Resposta em frequência de geofone com filtro de compensação não adequado

Desta forma, é possível obter uma resposta dinâmica linear na totalidade do intervalo de frequência de interesse contribuindo, assim, para a melhoria da exatidão da medição da deflexão. De acordo com (Clemen; 1998), um desvio de 0,5 Hz na frequência de corte do filtro de compensação pode originar um desvio próximo de 5% no valor de pico da deflexão.

O conhecimento das frequências de corte individuais dos geofones é de tal forma crucial para a exatidão da medição de deflexão, que o ensaio de calibração prevê a determinação experimental desta grandeza dinâmica (Grontmij; 2012) (Grontmij; 2015), conforme se mostra no Quadro 2.3 para o caso do defletómetro de impacto do LNEC | UPAVMAT.

Quadro 2.3 – Frequências de corte dos geofones do defletómetro de impacto

Identificação do geofone	Frequência de corte / Hz	Identificação do geofone	Frequência de corte / Hz
1	4,435	6	4,423
2	4,546	7	4,833
3	4,695	8	4,473
4	4,742	9	4,882
5	4,594	---	---

Adicionalmente à análise da resposta em frequência de cada geofone, de forma a promover uma avaliação do efeito de linearização resultante da introdução na cadeia de medição do filtro de compensação, o ensaio de calibração inclui:

- i. a quantificação da relação linear (definida pelos parâmetros declive e ordenada na origem, *vide* Quadro 2.4) entre o sinal digital de saída do geofone e o valor de referência de deslocamento, baseada na sincronização entre valores de pico, para o qual se define um desvio máximo admissível de 0,1% entre as medições efetuadas com o padrão de referência e o geofone (Grontmij; 2012) (Grontmij, 2015);

Quadro 2.4 – Parametrização linear dos geofones

Identificação do geofone	Declive / μm	Ordenada na origem	Identificação do geofone	Declive / μm	Ordenada na origem
1	11,348	13,666	6	11,326	11,327
2	11,280	-2,424	7	10,994	-0,681
3	10,864	2,7945	8	11,335	-15,602 5
4	10,896	-1,121	9	10,663	16,879 5
5	11,216	5,916	---	---	---

- ii. o ensaio de linearidade, onde os desvios de calibração são avaliados para um intervalo alargado de impulsos dinâmicos no que respeita ao tempo de subida e amplitude, conforme se mostra na Figura 2.9 (Clemen; 1998);

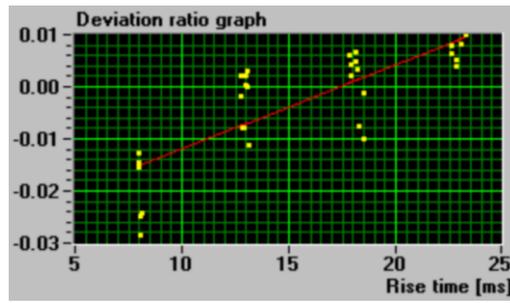


Figura 2.9 – Exemplo de resultados do ensaio de linearidade de um geofone (tempo de subida vs. desvio relativo)

3 | Avaliação da incerteza de medição da deflexão

3.1 Formulação probabilística das componentes de incerteza

A abordagem de avaliação das incertezas de medição adotada neste estudo segue as linhas gerais descritas no guia GUM (JCGM 100:2008), neste caso, aplicada à medição da deflexão em pavimentos com recurso ao defletómetro de impacto. Nas secções seguintes, é apresentada a formulação probabilística de cada uma das componentes de incerteza identificadas no processo de medição estudado.

3.1.1 Padrão de referência para calibração dos geofones

A incerteza instrumental do padrão de referência – sensor de posicionamento linear do tipo LVDT com indicador digital – associado ao gerador de vibrações utilizado na calibração dos geofones, constitui uma componente de incerteza para a medição da deflexão. Este tipo de padrão de referência dimensional apresenta, tipicamente, uma incerteza expandida (95%) instrumental próxima de $0,33 \mu\text{m}$ o que, em termos relativos e tendo em consideração o intervalo de medição de interesse no caso em estudo (compreendido entre $0 \mu\text{m}$ e $2200 \mu\text{m}$), corresponde a uma incerteza padrão relativa, $u_{r\text{cal}}(d)$, igual a $0,0075\%$, a que se associa uma distribuição normal com 50 graus de liberdade.

3.1.2 Deriva instrumental

A análise da deriva instrumental dos nove geofones do defletómetro de impacto do LNEC – EM | UPAVMAT é suportada nos resultados das calibrações deste equipamento de ensaio, efetuadas em setembro de 2012 (Grontmij, 2012) e março de 2015 (Grontmij, 2015). Em particular, foi avaliada a evolução da estimativa do parâmetro linear declive, conforme se mostra no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Deriva das estimativas de declive dos geofones

Identificação do geofone	Estimativa do declive (setembro de 2012) / μm	Estimativa do declive (março de 2015) / μm	Deriva instrumental (36 meses) / μm
1	11,348	11,388	0,049
2	11,280	11,236	0,053
3	10,864	10,798	0,079
4	10,896	10,871	0,031
5	11,216	11,196	0,023
6	11,326	11,342	0,019
7	10,994	11,000	0,008
8	11,335	11,360	0,030
9	10,663	10,673	0,012

Considerando uma periodicidade de calibração igual a 36 meses, o valor máximo de deriva instrumental obtido corresponde a 0,079 μm (geofone n.º 3), ao qual se pode associar a esta componente de incerteza, $u_{r_der}(d)$, uma distribuição de probabilidade uniforme com semi-amplitude igual ao valor mencionado.

3.1.3 Repetibilidade a curto prazo

A quantificação desta componente de incerteza, $u_{r_rep}(d)$, é baseada na informação disponível (Grontmij, 2012) (Grontmij, 2015) sobre os ensaios de repetibilidade a curto prazo, realizados no âmbito da calibração do defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT. A amostra de valores medidos de deflexão por cada geofone em condições de repetibilidade apresenta uma dimensão igual a 12, tendo sido determinados os respetivos desvios padrão experimentais que se apresentam no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Resultados dos ensaios de repetibilidade a curto prazo

Identificação do geofone	Desvio padrão experimental da amostra (setembro de 2012)	Desvio padrão experimental da amostra (março de 2015)
1	0,0 %	0,6 %
2	0,2 %	0,3 %
3	0,0 %	0,3 %
4	0,5 %	0,2 %
5	0,0 %	0,2 %
6	0,7 %	0,6 %
7	0,7 %	0,9 %
8	1,2 %	1,0 %
9	1,6 %	0,0 %

Por sua vez, com base na amostra de desvios padrão experimentais apresentada (com dimensão igual a 18) foi determinado um valor médio de dispersão (0,5 %) representativo da repetibilidade a curto prazo, considerando-se adequada a adoção de uma distribuição de probabilidade normal.

3.1.4 Desvios relativos entre geofones

Imediatamente após a calibração do defletómetro de ensaio e em acréscimo ao ensaio de repetibilidade de curto prazo, é realizado um ensaio adicional – o ensaio da torre de empilhamento – onde todos os geofones do defletómetro de impacto são instalados numa estrutura dedicada que permite a medição simultânea da mesma deflexão, o que permite quantificar os desvios relativos entre geofones.

No Quadro 3.3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios da torre de empilhamento efetuados com defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT (Grontmij; 2012) (Grontmij, 2015). Com base nos desvios-padrão experimentais expostos neste Quadro, a componente de incerteza associada aos desvios relativos entre geofones, $u_{r_dev}(d)$, é quantificada mediante a adoção de uma

distribuição normal com o valor máximo de dispersão observado nos dois ensaios, ou seja, 0,7 μm ou 0,2 %.

Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios da torre de empilhamento com o defletómetro de impacto

Identificação do geofone	Valor lido de deflexão (setembro de 2012) / μm	Valor lido de deflexão (março de 2015) / μm
1	315,8	360,8
2	316,5	358,8
3	316,9	359,2
4	316,2	358,7
5	316,4	359,0
6	315,9	359,0
7	315,9	359,7
8	315,9	359,4
9	315,9	360,5
Valor médio / μm	316,2	359,5
Desvio padrão experimental da amostra / μm	0,4	0,7

3.1.5 Linearidade

Esta componente de incerteza foi quantificada com base na informação disponível do fabricante do equipamento de ensaio (Clemen; 1998) sobre o seu desempenho típico na realização de ensaios de linearidade, após finalização da sua calibração. Neste ensaio, os desvios de calibração são quantificados para um intervalo alargado de impulsos dinâmicos, nomeadamente, no que diz respeito ao tempo de subida. No Quadro 3.4 é apresentado um exemplo dos desvios de linearidade obtidos para um equipamento de ensaio idêntico ao do LNEC-EM | UPAVMAT.

Quadro 3.4 – Resultados de ensaio de linearidade

Tempo de subida / ms	Desvio de calibração	Desvio obtido por regressão linear	Desvio de linearidade
18,54	0,11 %	0,15 %	0,04 %
18,32	0,76 %	0,11 %	0,65 %
18,53	1,01 %	0,14 %	0,87 %
12,82	0,21 %	0,77 %	0,56 %
13,01	0,21 %	0,74 %	0,53 %
13,06	0,29 %	0,73 %	0,44 %
12,77	0,19 %	0,78 %	0,59 %
13,06	0,01 %	0,73 %	0,72 %
13,01	0,04 %	0,74 %	0,70 %
12,91	0,79 %	0,75 %	0,04 %
13,18	1,11 %	0,71 %	0,40 %
12,89	0,78 %	0,76 %	0,02 %
7,96	1,55 %	1,55 %	0,00 %

A quantificação da componente de incerteza associada à linearidade, $u_{r\text{lin}}(d)$, é suportada no valor máximo de desvio de linearidade (0,87 %) apresentado no Quadro anterior, tendo em consideração a adoção de uma distribuição uniforme com semi-amplitude igual ao valor máximo do desvio mencionado.

3.1.6 Desvios sistemáticos do valor de pico da deflexão

Na calibração do defletómetro de impacto são observados desvios sistemáticos entre os valores lidos no equipamento de ensaio e os valores de referência (padrão de medição), cuja magnitude está dependente da utilização de um filtro de compensação ajustado à frequência de corte individual de cada geofone. No caso do defletómetro de impacto do LNEC – EM | UPAVMAT, os certificados de calibração não apresentam informação sobre a magnitude dos desvios sistemáticos associados aos valores de pico da deflexão, pelo que se teve em conta os valores típicos de desvio mencionados por (Clemen; 1998), conforme se mostra no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resultados de ensaio de calibração

Identificação da queda	Valor lido / μm	Valor de referência / μm	Desvio relativo
1	497,1	497,0	0,02 %
2	500,9	501,0	0,02 %
3	500,2	500,6	0,08 %
4	498,8	499,4	0,12 %
5	500,4	500,4	0,00 %
6	498,7	499,1	0,08 %
7	500,6	500,0	0,12 %
8	500,3	500,2	0,02 %
9	499,8	500,7	0,18 %
10	499,9	500,7	0,16 %

Tendo em conta o valor máximo típico de desvio mencionado por (Clemen;1998), esta componente de incerteza, $u_{r\text{sis}}(d)$, é quantificada com base na adoção de uma distribuição uniforme com uma semi-amplitude igual a 0,18 %.

3.1.7 Arredondamento do valor de pico da deflexão

De acordo com a norma de ensaio (ASTM D4694-09), as estimativas dos valores de pico das deflexões medidas pelos geofones devem ser arredondados para μm , o que efetivamente se verifica no ficheiro de registo de dados na aplicação computacional utilizada pelo LNEC-EM | PAVMAT. Com efeito, a componente de incerteza relativa associada ao arredondamento, $u_{r\text{arr}}(d)$, é quantificada com base na adoção de uma distribuição uniforme com limites de variação relativa igual a $\pm \frac{0,5 \mu\text{m}}{d} \times 100$.

3.2 Propagação das incertezas de medição

A linearidade do modelo matemático associado à medição da deflexão, d , com o defletómetro de impacto permite que seja utilizada a Lei de Propagação da Incerteza (LPI) na determinação da incerteza de medição desta grandeza. Tendo em conta as componentes de incerteza enumeradas na secção anterior (3.1), a incerteza padrão de medição relativa da deflexão, $u_r(d)$, é dada pela seguinte expressão resultante da aplicação da LPI:

$$u_r(d) = \sqrt{u_{r\text{ cal}}^2(d) + u_{r\text{ der}}^2(d) + u_{r\text{ rep}}^2(d) + u_{r\text{ dev}}^2(d) + u_{r\text{ lin}}^2(d) + u_{r\text{ sis}}^2(d) + u_{r\text{ arr}}^2(d)}, \quad (1)$$

Tendo em conta a expressão anterior, o Quadro 6.6 apresenta o balanço da incerteza de medição da deflexão com recurso ao defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT.

Quadro 3.6 – Balanço de incertezas de medição da deflexão com recurso a um defletómetro de impacto

Componente de incerteza $u(x_i)$	Fonte de incerteza	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão de medição relativa $u_r(x_i)$	Graus de liberdade
$u_{r\text{ cal}}(d)$	Calibração	Normal	0,007 5%	50
$u_{r\text{ der}}(d)$	Deriva instrumental	Uniforme	0,003 6 % / $\sqrt{3} = 0,002$ 1%	50
$u_{r\text{ rep}}(d)$	Repetibilidade a curto prazo	Normal	0,50%	17
$u_{r\text{ dev}}(d)$	Desvios relativos	Normal	0,32%	8
$u_{r\text{ lin}}(d)$	Linearidade	Uniforme	0,87 % / $\sqrt{3} = 0,50$ %	50
$u_{r\text{ sis}}(d)$	Desvios sistemáticos	Uniforme	0,18 % / $\sqrt{3} = 0,10$ %	50
$u_{r\text{ arr}}(d)$	Arredondamento	Uniforme	0,002 3 % / $\sqrt{3} = 0,013$ %	50
Incerteza padrão combinada relativa, $u_{c\text{ r}}(d)$:			0,78 %	
Graus de liberdade efetivos, ν_{ef} :			60	
Fator de expansão, k :			2,00	
Incerteza expandida (95%) relativa, $U_{95\%}(d)$:			1,6 %	

A propagação das incertezas de medição identificadas para a grandeza deflexão revela que a sua incerteza expandida relativa corresponde a 1,6 %, apresentando 60 graus de liberdade efetivos e um fator de expansão de 2,00 para um intervalo de confiança de 95 %.

No conjunto de fontes de incertezas identificadas, a repetibilidade a curto prazo e a linearidade apresentam as maiores contribuições para o valor de incerteza obtido, seguindo-se os desvios relativos entre geofones e os desvios sistemáticos obtidos em calibração.

4 | Considerações finais

O presente estudo permitiu efetuar a avaliação da incerteza de medição associada à grandeza deflexão no ensaio de pavimentos com recurso a defletómetro de impacto, realizado pelo LNEC-EM | UPAVMAT no âmbito da acreditação desta unidade laboratorial.

O conhecimento adquirido acerca da qualidade da medição da deflexão efetuada por esta unidade laboratorial, quantificada pela incerteza de medição, possibilita um julgamento fundamentado e rigoroso do seu desempenho na concretização do referido ensaio laboratorial, em particular, no contexto da realização de ensaios de aptidão com outras entidades. Identifica, igualmente, as contribuições mais significativas para a incerteza de medição da deflexão, nomeadamente, as componentes de repetibilidade a curto prazo e de linearidade.

Atendendo à quantificação das componentes de incerteza identificadas, o valor da incerteza expandida (95%) relativa de medição da deflexão obtido (1,6 %) pode ser considerado como representativo da melhor incerteza de medição do LNEC-EM | UPAVMAT no contexto da sua acreditação no Sistema Português da Qualidade, evidenciando o cumprimento do requisito imposto pela norma de referência (NP EN ISO/IEC 17025:2005). O valor obtido evidencia igualmente o cumprimento do requisito normativo de exatidão (igual ou inferior a 2 %) na medição da deflexão (ASTM D4694-09).

Lisboa, LNEC, novembro de 2017

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

- ASTM D4694-09 – **Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device**. ASTM International, 2009.
- ASTM D4695-03 – **Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements**. ASTM International, 2003.
- CARL Bro, 2004 – **Technical Specifications – PRI 2100 FWD trailer version**. Carl Bro, April 2004.
- CLEMEN, René, 1998 – **Guidelines for calibration of Falling Weight Deflectometers**. Proceedings of the 5th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Thronheim (Norway), 6-8 July, 1998.
- FONTUL, Simona, 2004 – **Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests**. Ph. D thesis, Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- GRONTMIJ, 2012 – **Calibration Certificate of the FWD PRI 2100 (SN 0608-125)**. Grontmij Pavement Consultants A/S, September 2012.
- GRONTMIJ, 2015 – **Calibration Certificate of the FWD PRI 2100 (SN 0608-125)**. Grontmij Pavement Consultants A/S, March 2015.
- JCGM 100:2008 – **Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)**. Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML), 2008.
- IRWIN, Lynne; ORR, David; ATKINS, Daniel, 2011 – **Falling Weight Deflectometer Calibration Center and Operational Improvements: Redevelopment of the Calibration Protocol and Equipment**. Publication no. FHWA-HRT-07-040, October 2011.
- NP EN ISO/IEC 17025:2005 – **Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração**. Instituto Português da Qualidade, 2005.
- SM-6, 2003 – **SM-6 Geophone**, Input/Output, Inc., Sensor Nederland bv, 2003.

ANEXO

Avaliação de incerteza de medição da força

No processo de medição de força associado ao defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT foram identificadas as seguintes componentes de incerteza:

- I. calibração da cadeia de medição de força – embora os certificados de calibração do equipamento de ensaio (Grontmij; 2012) (Grontmij; 2015) sejam omissos quanto à declaração da incerteza de calibração, $u_{r\text{cal}}(F)$, foi considerado o valor típico de 0,11% associado à calibração de transdutores de força no LNEC-EM, em modo de compressão, e no intervalo de medição de interesse (compreendido entre 45 kN e 250 kN);
- II. desvios sistemáticos – de acordo com os resultados experimentais das calibrações da cadeia de medição de força do equipamento (Grontmij; 2012) (Grontmij; 2015), expostos no Quadro A.1, considera-se que esta componente de incerteza, $u_{r\text{dev}}(F)$, é adequadamente representada por uma distribuição uniforme centrada num valor nulo e com uma semi-amplitude igual a 1,41 %;

Quadro A.1 – Resultados experimentais das calibrações da cadeia de medição de força

Data de calibração	Setembro de 2012				Março de 2015				
	Valor nominal / kN	Valor lido / kN	Valor de referência / kN	Desvio relativo	Desvio padrão	Valor lido / kN	Valor de referência / kN	Desvio relativo	Desvio padrão
40	---	---	---	---	---	---	---	---	---
45	45,74	45,61	45,61	0,28 %	0,09 %	---	---	---	---
50	49,24	48,90	48,90	0,69 %	0,06 %	51,72	50,99	1,41 %	0,11 %
55	54,96	54,77	54,77	0,35 %	0,08 %	---	---	---	---
60	59,86	59,74	59,74	0,21 %	0,18 %	61,12	61,17	-0,08 %	0,02 %
65	64,04	64,05	64,05	-0,01 %	0,08 %	---	---	---	---
70	68,04	68,26	68,26	-0,32 %	0,01 %	69,09	69,36	-0,39 %	0,19 %
75	75,28	75,92	75,92	-0,85 %	0,02 %	76,11	76,49	-0,51 %	0,31 %
80	---	---	---	---	---	82,44	82,96	-0,63 %	0,00 %
85	---	---	---	---	---	88,19	89,19	-1,13 %	0,03 %
90	---	---	---	---	---	93,66	94,68	-1,09 %	0,30 %

- III. repetibilidade – esta componente de incerteza, $u_{r\text{rep}}(F)$, é quantificada com base no valor máximo do desvio padrão experimental da amostra observado no registo histórico de resultados das calibrações da grandeza força (vide Quadro A.1), considerando-se adequada a adoção de uma distribuição normal com um desvio padrão igual a 0,31 %;
- IV. deriva instrumental – existindo alguns valores nominais de força (50 kN, 60 kN, 70 kN e 75 kN) em comum entre as duas calibrações do defletómetro de impacto (Grontmij; 2012) (Grontmij; 2015), é possível determinar os valores de deriva instrumental associada à medição da força, os quais se apresentam no Quadro A.2, tendo em conta uma periodicidade de calibração igual a 36 meses; na quantificação desta componente de incerteza, $u_{r\text{der}}(F)$,

foi considerada uma distribuição de probabilidade uniforme com uma semi-amplitude igual ao valor máximo de deriva obtido para o valor nominal de 50 kN (0,84 % / 36 meses);

Quadro A.2 – Análise da deriva instrumental da medição de força

Data de calibração	Setembro de 2012	Março de 2015	Deriva instrumental (36 meses)
Valor nominal / kN	Desvio relativo	Desvio relativo	
50	0,69 %	1,41 %	0,84 %
60	0,21 %	-0,08 %	0,34 %
70	-0,32 %	-0,39 %	0,09 %
75	-0,85 %	-0,51 %	0,40 %

- V. resolução da cadeia de medição – a consulta dos ficheiros de registo automático de dados experimentais do equipamento de ensaio permite constatar que as medições de força são efetuadas com uma resolução igual a 0,01 kN, pelo que esta componente de incerteza, $u_{r\text{res}}(F)$, é representada por uma distribuição uniforme centrada num valor nulo e com uma semi-amplitude igual a metade da resolução anteriormente indicada.

A linearidade do modelo matemático associado à medição da força, F , com o defletómetro de impacto permite que seja utilizada a Lei de Propagação da Incerteza (LPI) na determinação da incerteza de medição desta grandeza. Tendo em conta as componentes de incerteza enumeradas e quantificadas anteriormente, a incerteza padrão de medição relativa da força, $u_r(F)$, é dada pela seguinte expressão:

$$u_r(F) = \sqrt{u_{r\text{cal}}^2(F) + u_{r\text{dev}}^2(F) + u_{r\text{rep}}^2(F) + u_{r\text{der}}^2(F) + u_{r\text{res}}^2(F)}, \quad (2)$$

Tendo em conta a expressão anterior, o Quadro A.3 apresenta o balanço da incerteza de medição da força com recurso ao defletómetro de impacto do LNEC-EM | UPAVMAT.

Quadro A.3 – Balanço de incertezas de medição da força

Componente de incerteza $u(x_i)$	Fonte de incerteza	Distribuição de probabilidade	Incerteza-padrão de medição relativa $u_r(x_i)$	Graus de liberdade
$u_{r\text{cal}}(F)$	Calibração	Normal	0,11%	50
$u_{r\text{dev}}(F)$	Desvios sistemáticos	Uniforme	$1,41\% / \sqrt{3} = 0,81\%$	50
$u_{r\text{rep}}(F)$	Repetibilidade	Normal	0,31%	10
$u_{r\text{der}}(F)$	Deriva instrumental	Uniforme	$0,84\% / \sqrt{3} = 0,49\%$	50
$u_{r\text{res}}(F)$	Resolução	Uniforme	$0,002\% / \sqrt{3} = 0,001\ 2\%$	50
Incerteza-padrão combinada relativa, $u_{c,r}(F)$:			1,0 %	
Graus de liberdade efetivos, v_{ef} :			93	
Fator de expansão, k :			1,99	
Incerteza expandida (95%) relativa, $U_{95\%}(F)$:			2,0 %	

A propagação das incertezas de medição identificadas para a grandeza força revela que a sua incerteza expandida relativa corresponde a 2,0 %, apresentando 93 graus de liberdade efetivos e um fator de expansão de 1,99 para um intervalo de confiança de 95%. Deste modo, é possível concluir que o valor de incerteza obtido cumpre o requisito normativo de exatidão (igual ou inferior a 2 %) na medição da força (ASTM D4694-09).

A análise de sensibilidade mostrou que, no conjunto de fontes de incertezas identificadas, os desvios sistemáticos constituem a maior contribuição para o valor de incerteza combinada, seguindo-se a deriva instrumental e a repetibilidade associadas à cadeia de medição de força no defletómetro de impacto.

