



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CARACTERIZAÇÃO 3D DE UM MODELO FÍSICO REDUZIDO DE UM PILAR DE UMA PONTE

Estudo realizado por solicitação do
Departamento de Hidráulica e Ambiente

Lisboa • setembro de 2019

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 318/2019 – **CIC/NQM**

Título

CARACTERIZAÇÃO 3D DE UM MODELO FÍSICO REDUZIDO DE UM PILAR DE UMA PONTE

Autoria

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Luís Filipe Lages Martins

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Qualidade Metrológica

Alexandre Vieira Pinheiro

Bolseiro de Experimentação, 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 318/2019

Proc. 0904/112/2097005

CARACTERIZAÇÃO 3D DE UM MODELO FÍSICO REDUZIDO DE UM PILAR DE UMA PONTE

Resumo

Este relatório descreve o estudo de caracterização tridimensional de um modelo físico reduzido de um pilar de uma ponte, realizado pelo Núcleo de Qualidade Metrológica do Centro de Instrumentação Científica em resposta à solicitação do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC. O presente documento contém uma descrição sumária do objeto sujeito a medição referindo, também, o conjunto de ações preliminares desenvolvidas para a realização do ensaio dimensional e geométrico pretendido, suportado na utilização de uma máquina de medição de coordenadas tridimensional. É apresentado, em detalhe, o ensaio dimensional e geométrico realizado, o qual teve por objetivo a obtenção das coordenadas espaciais tridimensionais de pontos que foram posteriormente utilizadas para a construção de um modelo computacional do pilar de uma ponte.

Palavras-chave: Caracterização / Tridimensional / Modelo reduzido / Pilar / Ponte

3D CHARACTERIZATION OF A REDUCED SCALE PHYSICAL MODEL OF A BRIDGE PILLAR

Abstract

This report describes the three-dimensional study of a reduced scale physical model of a bridge pillar, performed by the Metrological Quality Unit of the Scientific Instrumentation Centre in response to a request from the Water Resources and Hydraulic Structures Unit of LNEC's Hydraulics and Environment Department. The current document contains a brief description of the measured object, also mentioning the set of preliminary actions developed for the pretended dimensional and geometrical test, which was supported in the use of a three-dimensional coordinate measuring machine. The performed dimensional and geometrical test is shown in detail, aiming the determination of the three-dimensional spatial coordinates of points which were used posteriorly in the construction of a computational model of the bridge pillar.

Keywords: Characterization / Three-dimensional / Reduced scale model / Pillar / Bridge

Índice

1	Introdução	1
2	Preparação dos ensaios	3
2.1	Estabilização Térmica.....	3
2.2	Instalação e imobilização do modelo físico	3
2.3	Parametrização e qualificação da ponteira de medição	3
3	Ensaio de caracterização tridimensional.....	6
3.1	Introdução	6
3.2	Determinação do referencial de medição	7
3.3	Determinação das coordenadas espaciais das marcações de referência	7
3.4	Determinação das coordenadas espaciais de pontos na escala graduada	8
3.5	Determinação das coordenadas espaciais de pontos nas superfícies do modelo.....	8
3.6	Resultados	10
3.7	Rastreabilidade e incerteza de medição.....	12
4	Considerações finais.....	14
	Referências bibliográficas	15
	ANEXO Rotina computacional de medição na MMC 3D	17

Índice de figuras

Figura 1.1 – Modelo físico reduzido do pilar	1
Figura 1.2 – Representação esquemática do pilar	1
Figura 2.1 – Ângulos de posicionamento da ponteira	4
Figura 2.2 – Esfera padrão da MMC 3D	4
Figura 2.3 – Correspondência entre as posições de medição da ponteira e as superfícies medidas no modelo PIER 17	5
Figura 3.1 – Sistema de coordenadas coincidente com os eixos de simetria do modelo PIER 17	6
Figura 3.2 – Sistema de coordenadas adotado na caracterização 3D	6
Figura 3.3 – Identificação das seis marcações de referência na superfície de topo do modelo PIER 17	7
Figura 3.4 – Escala graduada no modelo PIER 17	8
Figura 3.5 – Medição de um ponto na escala graduada	8
Figura 3.6 – Referencial de medição localizado no centro de curvatura e expresso em coordenadas cilíndricas	9
Figura 3.7 – Pontos medidos nas marcações de referência na superfície de topo do modelo físico.....	11
Figura 3.8 – Pontos medidos na escala graduada do modelo físico	11
Figura 3.9 – Pontos medidos na superfície frontal do modelo físico	11
Figura 3.10 – Pontos medidos na superfície lateral esquerda do modelo físico	11
Figura 3.11 – Pontos medidos na superfície posterior do modelo físico	12
Figura 3.12 – Pontos medidos na superfície lateral direita do modelo físico.....	12
Figura 3.13 – Pontos medidos na superfície de topo do modelo físico	12
Figura 3.14 – Pontos medidos na totalidade do modelo físico reduzido PIER 17	12

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Estimativas das coordenadas espaciais das marcações de referência na superfície de topo do modelo	10
Quadro 3.2 – Estimativas das coordenadas espaciais dos pontos da escala graduada.....	10
Quadro 3.3 – Balanço de incertezas de medição dimensional	13
Quadro A.1 – Dimensões típicas dos modelos físicos reduzidos de pilares de pontes.....	19
Quadro A.2 – Variáveis da rotina computacional.....	19
Quadro A.3 – Siglas associadas à rotina computacional.....	20

1 | Introdução

A atividade metrológica desenvolvida pelo Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC é constituída por diferentes vertentes, uma das quais consiste na caracterização metrológica de protótipos, modelos físicos e materiais aplicados em estudos de Engenharia Civil. Esta atividade é desenvolvida em colaboração com outros sectores do LNEC ou com entidades externas constituindo, habitualmente, uma forma de obtenção de informação intermédia aplicada em estudos avançados.

O presente estudo foi efetuado por solicitação do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, tendo objetivo a caracterização tridimensional (3D) de um modelo físico reduzido de um pilar de uma ponte (*vide* Figura 1.1), visando a posterior aplicação dessa informação em modelação computacional numérica associada a estudos avançados de investigação e desenvolvimento em Hidráulica.



Figura 1.1 – Modelo físico reduzido do pilar

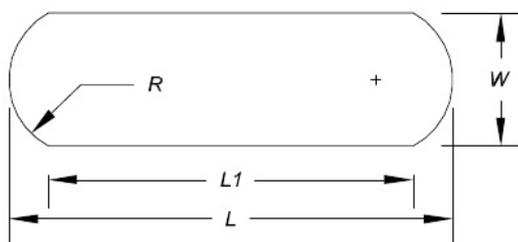


Figura 1.2 – Representação esquemática do pilar

O modelo físico em estudo, com a identificação “PIER 17”, possui as seguintes dimensões nominais representadas na Figura 1.2: (i) raio das superfícies semicilíndricas, R , de 95 mm; (ii) comprimento total, L , igual a 493 mm; (iii) comprimento das superfícies planas laterais, L_1 , de 388 mm; (iv) largura, W , igual a 170 mm; (v) altura de 370 mm.

A caracterização 3D do referido modelo foi efetuada nas instalações laboratoriais da Unidade de Metrologia Aplicada (UMA) do NQM usando, para esse efeito e como equipamento de referência, uma máquina de medição de coordenadas 3D (MMC 3D), marca DEA, modelo Gamma 2203, com o n.º informático LNEC 203.01. Este equipamento de ensaio dimensional e geométrico está rastreado ao padrão primário da grandeza Comprimento no âmbito do SI, sendo utilizado pela UMA na sua atividade laboratorial acreditada de calibração e de ensaio metrológico. As medições dimensionais e geométricas efetuadas por esta via são suportadas numa aplicação computacional dedicada

(MCOSMOS), a qual permite parametrizar e qualificar as ponteiras e as posições de medição utilizadas e desenvolver rotinas de programação visando a automatização dos processos de medição.

O estudo desenvolvido inclui diversos ensaios visando, numa primeira fase, estabelecer o referencial do sistema de coordenadas, alinhando com os eixos principais do modelo físico reduzido, de modo a permitir a translação de coordenadas para outro referencial; numa segunda fase, a definição e a medição das coordenadas espaciais associadas à caracterização 3D do modelo; e, numa terceira fase, o agrupamento de toda a informação recolhida, relacionada à origem do referencial do sistema de coordenadas, gerando o ficheiro com a informação completa da geometria 3D do objeto de interesse, i.e., o modelo reduzido de um pilar de uma ponte (adiante denominado simplificado por PIER 17).

Salienta-se que a terminologia adotada neste documento segue as definições de conceitos fundamentais de natureza metrologia apresentados no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM; 2012) e que a avaliação de incertezas de medição segue o método proposto no guia internacional (JCGM 100; 2008) para a expressão da incerteza de medição.

2 | Preparação dos ensaios

2.1 Estabilização Térmica

Os ensaios de natureza dimensional possuem no seu procedimento, um período de estabilização térmica de modo a minimizar eventuais contribuições para as incertezas de medição associadas à influência da variação de temperatura.

De modo a cumprir os requisitos associados a esta área de medição, o modelo físico foi colocado nas instalações laboratoriais da UMA durante 24 horas, previamente à realização dos ensaios, de modo a garantir que a temperatura do mesmo seja equivalente à dos padrões de referência e à do ambiente laboratorial. No caso da grandeza Comprimento, a temperatura de referência nas salas laboratoriais é mantida no intervalo $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

2.2 Instalação e imobilização do modelo físico

Previamente à colocação do modelo na mesa plano da MMC 3D, esta superfície foi protegida com uma tela, de modo a evitar danos resultantes do contacto entre os materiais constituintes do modelo (betão) e da mesa (granito). A medição das coordenadas espaciais, que se pretende efetuar, não é afetada pela presença desta tela, dado que todos os valores de coordenadas obtidas serão relativos à origem do referencial de sistemas de coordenadas definido no modelo a ensaiar e, como tal, reproduzem medições relativas e não absolutas (associadas ao sistema de coordenadas da MMC 3D).

Para a imobilização do modelo na mesa plano da MMC 3D, não foi necessário efetuar qualquer tipo de fixação, uma vez que o peso próprio do modelo é suficiente para considerar desprezável o movimento resultante da ação da força de contacto exercida pelo apalpador da ponteira de medição no modelo. Este estado de imobilização foi confirmado mediante a realização de um ensaio prévio, que consistiu na repetição sucessiva de um conjunto de medições em posições pré-definidas, tendo sido verificado que esse contacto sucessivo não provocou alterações significativas entre as observações efetuadas em cada uma das posições de ensaio. Este facto permitiu considerar que a contribuição desta componente de incerteza não é significativa para a incerteza de medição global dos ensaios dimensionais e geométricos realizados.

2.3 Parametrização e qualificação da ponteira de medição

A utilização da MMC 3D na medição dimensional e geométrica de modelos requer a execução inicial de um processo de parametrização e qualificação da ponteira de medição, para o qual se recorre à aplicação computacional dedicada associada ao equipamento de medição.

Neste âmbito, o sistema de coordenadas associado à ponteira de medição é definido por dois ângulos, conforme ilustrado na Figura 2.1 : (i) o ângulo de elevação, A , associado ao eixo da ponteira

e com uma amplitude compreendida entre 0° (posição vertical) e $+105^\circ$; e o ângulo de azimute, B , que representa o ângulo de rotação da ponteira em torno do eixo vertical, com uma amplitude compreendida entre -180° e $+180^\circ$.

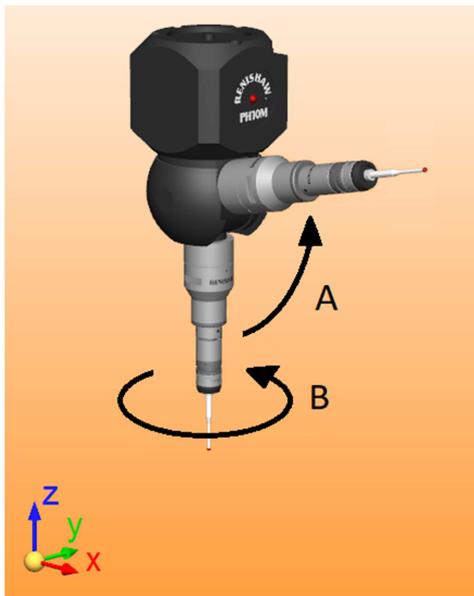


Figura 2.1 – Ângulos de posicionamento da ponteira



Figura 2.2 – Esfera padrão da MMC 3D

A parametrização efetuada tem por objetivo a caracterização dimensional da ponteira no que respeita à quantificação do diâmetro da esfera de apalpação e do comprimento do apalpador, visto que estes elementos podem ser alterados mediante as necessidades de medição (a MMC 3D tem disponível um conjunto diversificado de ponteiras com múltiplas esferas e diâmetros, bem como de extensões com dimensão linear variada).

A concretização experimental da parametrização pretendida é suportada na medição com a MMC 3D de uma esfera padrão (vide Figura 2.2) fixa na sua mesa plano, com um valor de referência de diâmetro conhecido e rastreado, mediante a medição das coordenadas espaciais de um conjunto de pontos localizados na sua superfície. A informação recolhida é processada pela aplicação computacional da MMC 3D e posteriormente usada, nos ensaios realizados, na correção sistemática das coordenadas espaciais medidas, de modo a ter em conta o diâmetro da esfera de apalpação e o comprimento do apalpador utilizados (Flack; 2001).

A parametrização descrita anteriormente para uma dada ponteira de medição, numa dada posição de medição definida pelos ângulos A e B , pode igualmente ser realizada para outras posições que, no seu conjunto, garantem a qualificação da ponteira para a realização posterior de medições dimensionais e geométricas num dado objeto de interesse. Para o caso particular em estudo – modelo PIER 17 – foram selecionadas as seguintes posições de medição (ilustradas na Figura 2.3):

- (i) na superfície de topo, $A = 0^\circ$ e $B = 0^\circ$;
- (ii) na superfície lateral esquerda (na vista frontal), $A = +45^\circ$ e $B = +90^\circ$;
- (iii) na superfície lateral direita, $A = +45^\circ$ e $B = -90^\circ$;
- (iv) na superfície frontal, $A = +45^\circ$ e $B = 0^\circ$;
- (v) na superfície posterior, $A = +45^\circ$ e $B = +180^\circ$.

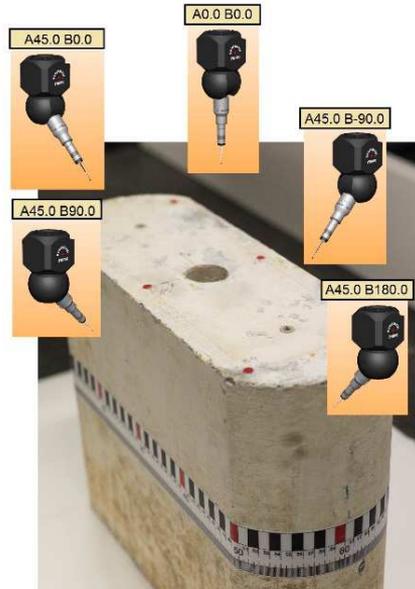


Figura 2.3 – Correspondência entre as posições de medição da ponteira e as superfícies medidas no modelo PIER 17

3 | Ensaio de caracterização tridimensional

3.1 Introdução

A caracterização tridimensional do modelo PIER 17 requer que se estabeleça a origem, o , do referencial do sistema de coordenadas cartesiano (x,y,z) utilizado no ensaio pretendido, onde ox representa o eixo longitudinal, oy corresponde ao eixo transversal e oz define o eixo vertical. A intersecção destes três eixos – a origem do referencial – deve possuir uma localização adequada que assegure que os eixos mencionados correspondam aos eixos de simetria do modelo, facilitando eventuais transformações de coordenadas espaciais para qualquer outro referencial de interesse. No caso do modelo PIER 17, o correspondente sistema de coordenadas está representado na Figura 3.1.

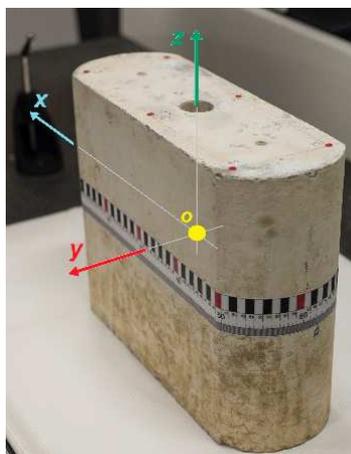


Figura 3.1 – Sistema de coordenadas coincidente com os eixos de simetria do modelo PIER 17

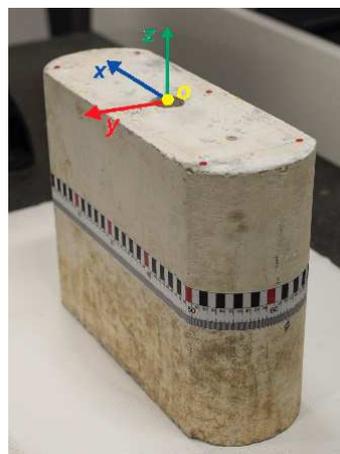


Figura 3.2 – Sistema de coordenadas adotado na caracterização 3D

Contudo, no presente estudo, a adoção do sistema de coordenadas indicado na Figura 3.1 mostrou-se inviável atendendo à posição da origem do referencial, a qual se encontra fisicamente inacessível à ponteira de medição da MMC 3D. A solução alternativa adotada decorreu da translação da origem, segundo o eixo vertical oz , para uma posição acessível à ponteira de medição na superfície de topo do modelo, conforme se mostra na Figura

O processo de caraterização 3D desenvolvido, descrito nas secções seguintes do presente Capítulo, é composto por cinco etapas sucessivas:

- (i) a determinação do referencial de medição;
- (ii) a medição das coordenadas espaciais das marcações circulares de referência, situadas na superfície de topo;
- (iii) a medição das coordenadas espaciais de pontos localizados na escala graduada que envolve o modelo PIER 17;

- (iv) a determinação das coordenadas espaciais dos conjuntos de pontos representativos das diferentes superfícies medidas (topo, frontal, posterior e laterais);
- (v) a reunião dos resultados parciais obtidos, de modo a definir o modelo computacional global representativo do modelo PIER 17.

3.2 Determinação do referencial de medição

A determinação do referencial de medição é particularmente relevante no processo de medição, uma vez que todas as medições subsequentes estão associadas ao ponto escolhido como origem do sistema de coordenadas. No caso em estudo, o referencial de medição foi construído com base nas seguintes construções computacionais:

- (i) o elemento geométrico plano, suportado na medição de seis pontos na superfície de topo, cujo vetor normal define o alinhamento do eixo vertical oz ;
- (ii) o elemento geométrico circunferência, obtido com base na medição de quatro pontos localizados à mesma altura no interior da superfície cilíndrica do furo passante de secção circular, que atravessa verticalmente o modelo PIER 17; a projeção do centro geométrico da circunferência obtida relativamente ao plano referido no ponto (i) anterior, permite definir a posição 3D da origem do referencial de medição;
- (iii) o elemento geométrico linha, construído através da medição de quatro pontos distribuídos pela superfície lateral esquerda, o qual permite definir o alinhamento do eixo longitudinal ox .

3.3 Determinação das coordenadas espaciais das marcações de referência

Na etapa seguinte do processo de caracterização foram determinadas as coordenadas espaciais das seis marcações de referência, K_i , representadas na Figura 3.3.

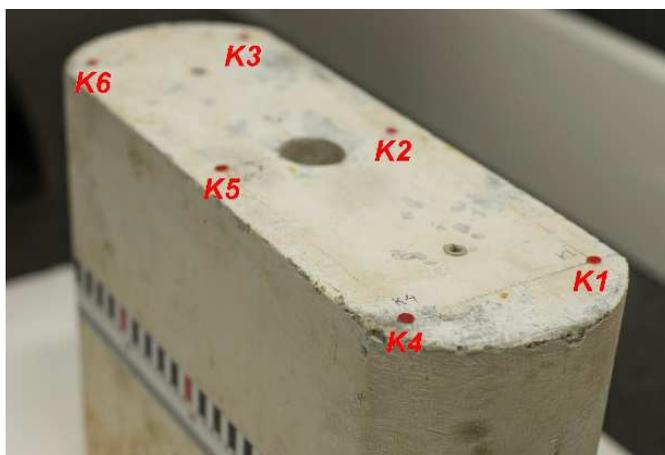


Figura 3.3 – Identificação das seis marcações de referência na superfície de topo do modelo PIER 17

Neste caso, a medição com a MMC 3D foi efetuada em modo manual, com base em elementos geométricos do tipo ponto, na região central de cada marcação de referência K_i . A determinação manual das coordenadas das coordenadas espaciais deste ponto implicou a necessidade de repetir cinco vezes as medições efetuadas em cada marcação, de modo a ser possível quantificar a sua repetibilidade e incluir o seu contributo no respetivo balanço de incerteza de medição.

3.4 Determinação das coordenadas espaciais de pontos na escala graduada

O modelo PIER 17 possui uma escala graduada colada na sua superfície (vide a Figura 3.4), a qual permite ter informação de natureza dimensional em imagens recolhidas em cenário de ensaio hidráulico, auxiliando o desenvolvimento de cálculos fotogramétricos nos estudos efetuados. O alcance da escala graduada corresponde a 120 cm fazendo-se notar, na colagem efetuada sobre o modelo PIER 17, a sobreposição vertical e horizontal aproximada das marcações de 0 cm e 120 cm (vide imagem de detalhe na Figura 3.4).

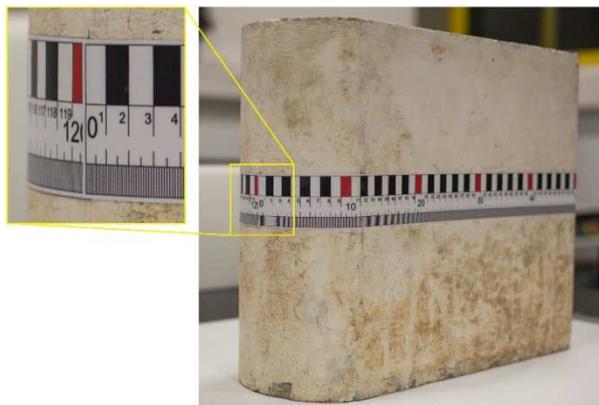


Figura 3.4 – Escala graduada no modelo PIER 17

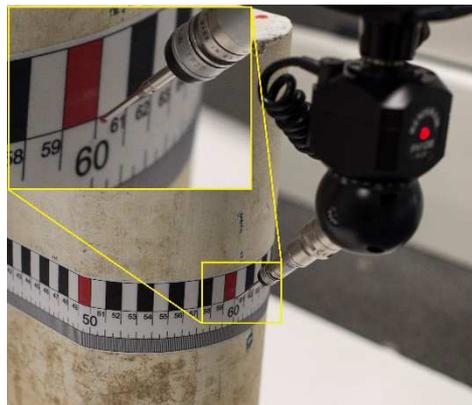


Figura 3.5 – Medição de um ponto na escala graduada

Tendo por objetivo o aumento da confiança e do rigor nas marcações da escala graduada, sobretudo nas regiões curvas semicilíndricas frontal e posterior, foram efetuadas medições das coordenadas espaciais de pontos de interesse localizados no canto inferior direito das marcações com cor vermelha, conforme se mostra na Figura 3.5.

A medição das coordenadas espaciais dos pontos de interesse na escala do modelo foi efetuada de forma manual, pelo que se efectuaram cinco medições por ponto de modo a ser possível quantificar a componente de incerteza associada à repetibilidade da medição.

3.5 Determinação das coordenadas espaciais de pontos nas superfícies do modelo

Nesta secção são descritos os principais aspetos relacionados com a determinação das coordenadas espaciais de pontos nas superfícies do modelo, os quais suportam a criação de um modelo

computacional (nuvem de pontos) representativo do modelo físico. Esta tarefa, efetuada com recurso à MMC 3D, foi realizada em modo automático (maioritariamente sem intervenção do operador), após o desenvolvimento de uma rotina computacional descrita em detalhe no Anexo deste relatório.

Na rotina computacional criada, foi necessário definir o processo de amostragem espacial dos pontos a medir em cada uma das superfícies planas (T – topo, LE – lateral esquerda e LD – lateral direita) e semicilíndricas (LT – posterior e LF – frontal) que compõem o modelo PIER 17. Tendo em conta a dimensão física e o tipo de superfície medida, a dimensão linear ou passo entre dois pontos na malha computacional criada para este efeito correspondeu a 4 mm para o caso das superfícies planas, e a 2 mm para o caso das superfícies semicilíndricas.

Tratando-se de um processo de medição automática foi necessário incluir, na rotina criada (*vide* Anexo), um algoritmo para o cálculo dos valores nominais das coordenadas associadas à localização da ponteira na região próxima (de procura) do ponto de medição na superfície do modelo PIER 17. O referido cálculo foi suportado nas dimensões do modelo, no valor do passo indicado anteriormente e na adoção de margens de segurança (para evitar choques entre a ponteira de medição e a superfície medida) com uma ordem de grandeza milimétrica.

No caso particular das superfícies semicilíndricas foi necessário considerar, em cada cota z , uma transformação de coordenadas para o referencial de medição (x',y',z') ilustrado na Figura 3.6, com origem localizada no respetivo centro de curvatura e a expressão em coordenadas cilíndricas (r, φ, z) , ou seja,

$$x' = r \cdot \cos \varphi, \tag{1}$$

$$y' = r \cdot \sin \varphi, \tag{2}$$

$$z' = z. \tag{3}$$

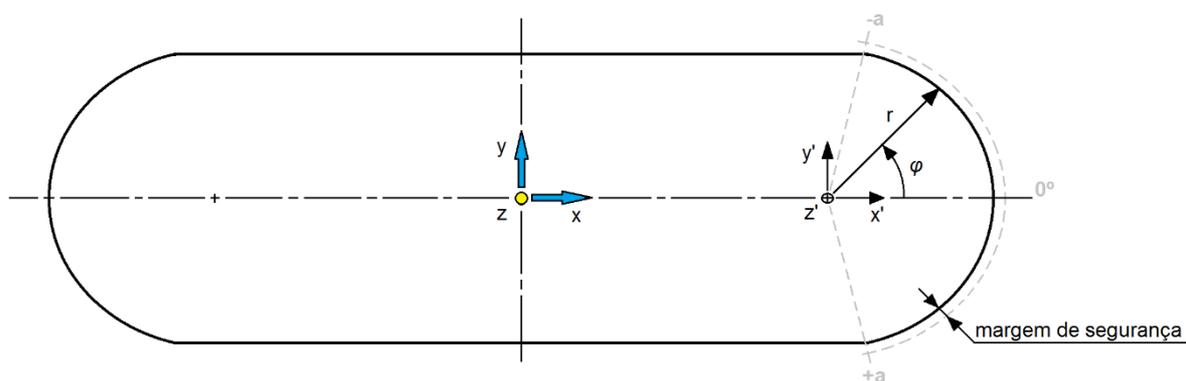


Figura 3.6 – Referencial de medição localizado no centro de curvatura e expresso em coordenadas cilíndricas

Na Figura 3.6 faz-se notar a adoção de uma margem de segurança no cálculo do valor nominal do raio de curvatura (da ordem de grandeza do milímetro) e uma variação do ângulo φ entre $(\pm a)$ que, na prática, corresponde aproximadamente a $\pm 64^\circ$.

3.6 Resultados

A utilização da MMC 3D permitiu estimar as coordenadas espaciais de pontos de interesse no modelo PIER 17, determinadas pelos valores médios associados às amostras experimentais de medições. Os resultados são apresentados no Quadro 3.1 e no Quadro 3.2, respetivamente, para as marcações de referência e para a escala graduada.

Quadro 3.1 – Estimativas das coordenadas espaciais das marcações de referência na superfície de topo do modelo

Identificação da marcação de referência	Estimativas das coordenadas espaciais		
	x	y	z
	/ mm	/ mm	/ mm
K₁	-194,521 7	-62,888 4	-0,098 3
K₂	1,247 1	-62,601 4	-0,030 4
K₃	195,738 5	-61,095 6	0,129 0
K₄	-194,140 6	64,368 5	0,099 7
K₅	2,729 0	63,692 4	-0,181 0
K₆	197,148 6	62,381 3	-0,006 6

Quadro 3.2 – Estimativas das coordenadas espaciais dos pontos da escala graduada

Identificação da marcação da escala graduada	Estimativas das coordenadas espaciais		
	x	y	z
	/ mm	/ mm	/ mm
P0	248,717 2	-1,301 1	-175,347 9
P10	202,610 4	81,989 4	-173,637 0
P100	101,933 5	-84,961 3	-173,582 9
P110	201,526 6	-82,915 5	-174,559 4
P120	248,608 1	-3,203 6	-175,151 6
P20	102,697 6	85,380 1	-172,039 8
P30	2,260 8	85,327 6	-171,470 8
P40	-97,761 7	85,396 7	-171,145 6
P50	-198,157 9	82,957 4	-171,373 6
P60	-246,138 8	0,091 7	-171,689 6
P70	-198,624 5	-82,650 5	-172,086 3
P80	-98,397 2	-85,493 9	-172,336 9
P90	1,746 8	-85,300 7	-172,867 4

Nas Figuras 3.7 e 3.8 são apresentadas as representações gráficas dos pontos medidos na aplicação computacional *CloudCompare* (versão 2.9.1), respetivamente, nas marcações de referência na superfície de topo e na escala graduada do modelo físico reduzido.

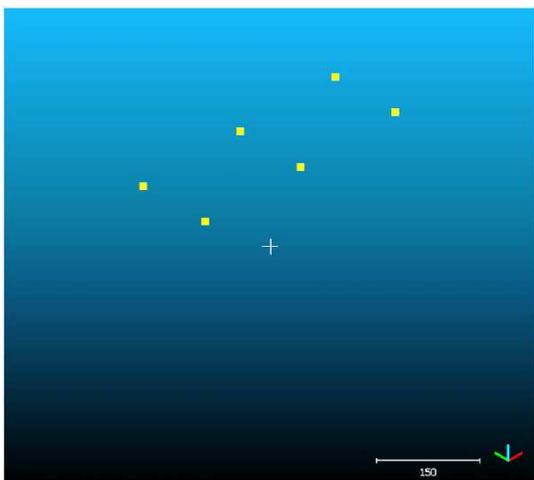


Figura 3.7 – Pontos medidos nas marcações de referência na superfície de topo do modelo físico

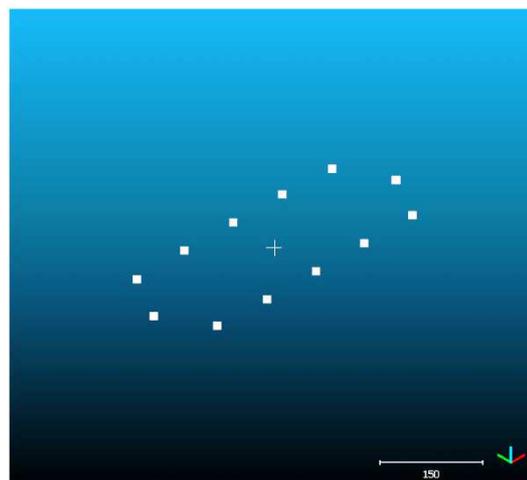


Figura 3.8 – Pontos medidos na escala graduada do modelo físico

No que respeita às coordenadas espaciais dos pontos medidos nas superfícies do modelo PIER17, o presente relatório não refere as estimativas obtidas, atendendo à elevada dimensão da amostra experimental (61 098 pontos medidos). Contudo, estes resultados foram entregues ao NRE por via informática, num ficheiro com formato de texto (.txt), possibilitando a sua importação para aplicações dedicadas à simulação computacional de estudos de fenómenos hidráulicos. Nas Figuras 3.9 a 3.13 são apresentadas as representações gráficas das superfícies medidas individualmente enquanto que, na Figura 3.14, é representada a totalidade dos pontos medidos no ensaio do modelo PIER 17.

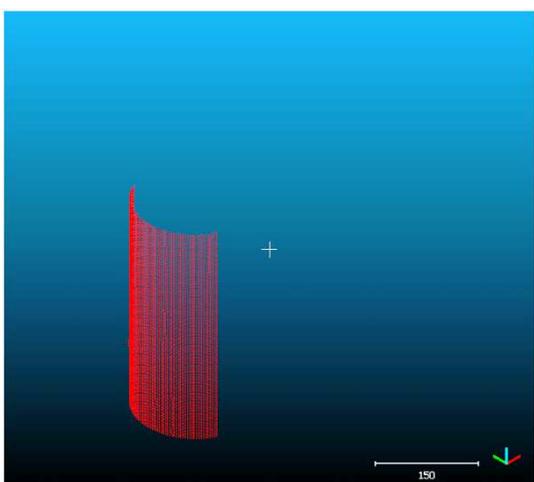


Figura 3.9 – Pontos medidos na superfície frontal do modelo físico

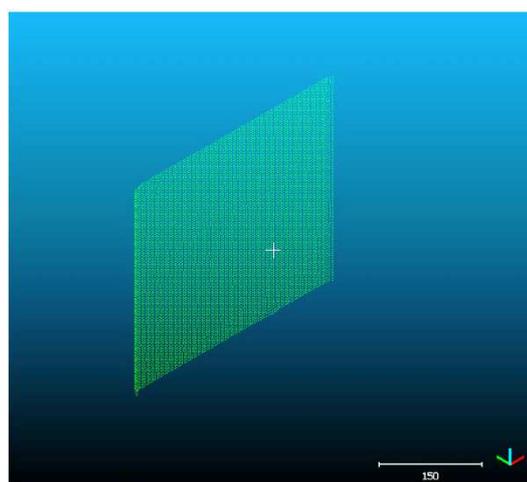


Figura 3.10 – Pontos medidos na superfície lateral esquerda do modelo físico

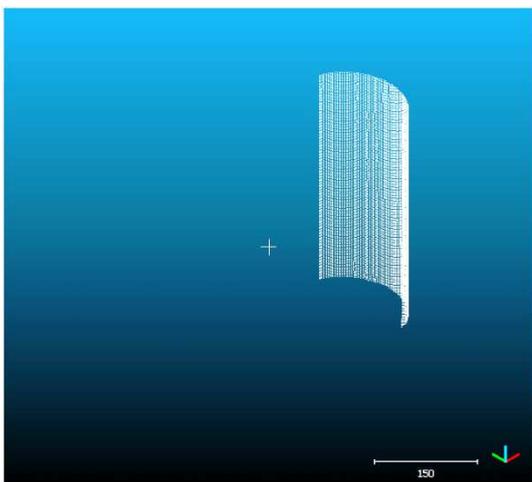


Figura 3.11 – Pontos medidos na superfície posterior do modelo físico

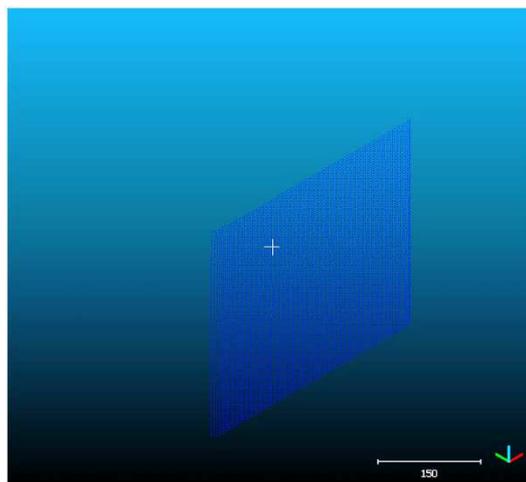


Figura 3.12 – Pontos medidos na superfície lateral direita do modelo físico

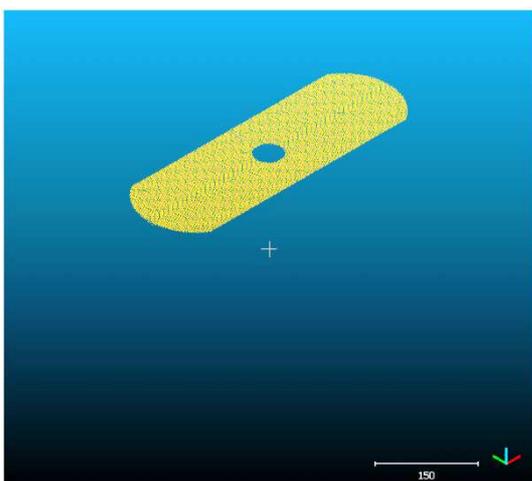


Figura 3.13 – Pontos medidos na superfície de topo do modelo físico

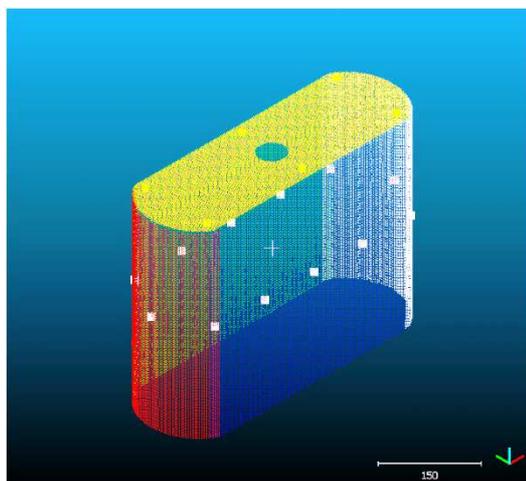


Figura 3.14 – Pontos medidos na totalidade do modelo físico reduzido PIER17

A validação dos resultados obtidos foi efetuada com base na comparação entre os valores medidos e nominais do modelo PIER 17 procurando detetar, neste processo, a ocorrência de observações espúrias (*outliers*), o que não se verificou nas amostras experimentais de valores medidos.

3.7 Rastreabilidade e incerteza de medição

Os resultados apresentados neste estudo estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam a unidade de medição da grandeza Comprimento de acordo com o SI. A MMC 3D utilizada foi calibrada em 2018-03-20 (certificado de calibração EAC – Laboratório de Ensaios e Calibrações n.º 01/020/2018), possuindo uma periodicidade de calibração de três anos. Por sua vez, a esfera padrão utilizada na parametrização e qualificação da ponteira de medição foi sujeita a medição

dimensional em 2019-06-22 (relatório de ensaio ISQ – Laboratório de Ensaio de Controlo Dimensional n.º EDIM 557/19), possuindo igualmente uma periodicidade de ensaio de três anos.

No que se refere à avaliação das incertezas de medição associadas aos resultados dimensionais obtidos, o Quadro 3.3 ilustra o balanço efetuado com base nas componentes de incerteza identificadas no processo de medição, considerando um limite superior do intervalo de medição igual a 500 mm.

Quadro 3.3 – Balanço de incertezas de medição dimensional

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
$u(L)_{IMA}$	Incerteza instrumental alvo da MMC 3D	Normal	1	0,002 5 mm	50
$u(L)_{der}$	Deriva instrumental da MMC 3D	Triangular	1	0,001 5 mm / $\sqrt{6}$	50
$u(L)_{rep,i}$	Repetibilidade instrumental	Uniforme	1	0,003 0 mm / $\sqrt{6}$	50
$u(L)_{rep,m}$	Repetibilidade do método	Normal	1	0,000 2 mm	50
$u(\alpha)$	Coefficiente linear de expansão térmica	Uniforme	$0,1 \cdot L$	$1,2 \cdot 10^{-7} \cdot L$	50
$u(\delta\theta)_{dif}$	Diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura de ref. ^a	Uniforme	$1,0 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$2,3 \cdot 10^{-7} \cdot L$	50
$u(\delta\theta)_{var}$	Varição cíclica da temperatura laboratorial	Arco-seno	$1,0 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$7,1 \cdot 10^{-7} \cdot L$	50
$u(\Delta\alpha)$	Diferença entre coeficientes lineares de expansão térmica	Uniforme	$0,5 \cdot L$	$2,9 \cdot 10^{-7} \cdot L$	50
$u(\Delta\theta)$	Diferença de temperatura entre a MMC 3D e o modelo físico	Uniforme	$11,5 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$6,6 \cdot 10^{-7} \cdot L$	50
$u_c(L)$	Incerteza-padrão combinada	$0,003 1 \text{ mm} + 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot L$ (com L em mm)			
v_{ef}	Graus de liberdade efetivos	180			
k	Fator de expansão	2,01			
$U_{95\%}(L)$	Incerteza expandida (95%)	0,007 3 mm (para $L = 500$ mm)			

A elaboração deste Quadro foi baseada no método GUM (JCGM 100; 2008) aplicando a Lei de Propagação de Incertezas e a fórmula de Welch-Satterthwaite visando, respetivamente, a determinação da incerteza-padrão combinada e do número de graus de liberdade efetivos.

4 | Considerações finais

O desenvolvimento recente da Metrologia, como ramo transversal da ciência, e a crescente consciência de que a qualidade da medição é um importante contributo para o rigor da investigação, tornam a Ciência da Medição, cada vez mais, um elemento necessário a estudos de I&D&I desenvolvidos no âmbito da Engenharia Civil.

O LNEC, ao promover o incremento das suas competências ao nível metrológico, tem criado condições para que a atividade desenvolvida nos seus diversos sectores beneficie diretamente destas valências, quer pela via da rastreabilidade da sua instrumentação científica, quer pela sua aplicação na medição de grandezas físicas.

O estudo desenvolvido permitiu ao NRE obter informação numérica de natureza dimensional e geométrica de um modelo físico reduzido de um pilar de uma ponte (PIER17), que será posteriormente utilizado na modelação computacional de fenómenos hidráulicos. Por sua vez, o NQM desenvolveu e consolidou competências numa área de atividade emergente, que poderá no futuro ser aplicada a outros modelos físicos reduzidos.

Lisboa, LNEC, agosto de 2019

VISTO

O Diretor do Centro de Instrumentação Científica



João Godinho Viegas

AUTORIA



Luís Filipe Lages Martins
Bolseiro Pós-Doutoramento



Alexandre Vieira Pinheiro
Bolseiro de Experimentação



Álvaro Silva Ribeiro
Investigador Auxiliar
Chefe do Núcleo de Qualidade Metrológica

Referências bibliográficas

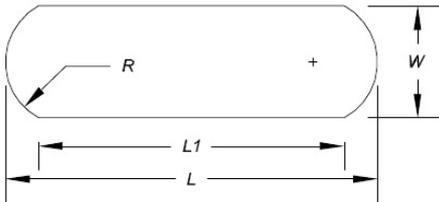
- FLACK, David, 2001 – **Good Practice Guide No. 42 – CMM Verification**. Issue 2, Teddington, Middlesex: NPL – National Physical Laboratory. ISSN 1368-6550.
- JCGM100:2008 – **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement**. 1st Edition, JCGM – Joint Committee for Guides in Metrology, September 2008.
- VIM:2012 – **Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM). Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1^a Edição Luso-Brasileira, Caparica: IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2008. ISBN 978-972-762-00-6.

ANEXO
Rotina computacional de medição na MMC 3D

No presente Anexo é descrita, em forma de fluxograma, a rotina computacional de medição desenvolvida na aplicação computacional MCOSMOS (versão 3.5) associada à utilização da MMC3D. A rotina criada é dedicada à caracterização 3D de modelos físicos reduzidos de pilares de pontes com dimensões e formas geométricas similares às do modelo ensaiado (PIER17), conforme se mostra no Quadro A.1.

Quadro A.1 – Dimensões típicas dos modelos físicos reduzidos de pilares de pontes

Grandeza	PIER 11	PIER 14	PIER 17
L_1	372 mm	380 mm	388 mm
L	433 mm	463 mm	493 mm
R	65 mm	80 mm	95 mm
W	110 mm	140 mm	170 mm
Altura	---	---	370 mm



Nos Quadros A.2 e A.3 são descritas as variáveis e as siglas associadas à rotina computacional de medição, que constam no fluxograma apresentado neste Anexo.

Quadro A.2 – Variáveis da rotina computacional

Variáveis	Tipo	Descrição
<i>Altura</i>	Real	Altura do pilar em mm
<i>i; ii</i>	Inteiro	Contadores de ciclos
<i>I; J</i>	Inteiro	Números de linha e de coluna, respetivamente, associados a cada ponto de medição
<i>IC</i>	Inteiro	Incremento das coordenadas (x,y) dos pontos de medição na superfície de topo
<i>L</i>	Real	Comprimento total do pilar
<i>L1</i>	Real	Comprimento da superfície plana lateral do pilar
<i>LIX; LIY</i>	Real	Limites inferiores das coordenadas (x,y), respetivamente
<i>Lop</i>	Inteiro	Valor limite de um ciclo
<i>LR</i>	Real	Distância entre centros de curvatura das superfícies semicilíndricas do pilar
<i>LSX; LSY</i>	Real	Limites superiores das coordenadas (x,y), respetivamente
<i>LS2X; LS2Y</i>	Real	Limites superiores das coordenadas (x,y), respetivamente
<i>Nensaio</i>	Inteiro	Número do ensaio executado
<i>NK</i>	Inteiro	Número de identificação do ponto medido em marcação de referência na superfície de topo
<i>NPT</i>	Inteiro	Número da memória onde são guardadas as características do elemento ponto
<i>Passo</i>	Real	Distância nominal entre pontos de medição sucessivos
<i>PIER</i>	Inteiro	Identificação do pilar ensaiado
<i>R</i>	Real	Raio de curvatura
<i>rep</i>	Booleano	Variável associada a repetição de questão
<i>Safe</i>	Real	Distância de segurança em mm
<i>W</i>	Real	Largura do pilar em mm
<i>XX; YY; ZZ</i>	Real	Valor das coordenadas (x, y, z)

Quadro A.3 – Siglas associadas à rotina computacional

Siglas	Descrição
@(...)	Introdução do valor numérico numa variável tipo caracter
C	Coluna
K	Ponto associado a uma marcação de referência na superfície de topo
Ks	Conjunto de pontos associado às marcações de referência na superfície de topo
L	Linha
LD	Superfície lateral direita
LE	Superfície lateral esquerda
LF	Superfície frontal
LT	Superfície posterior
P0 ... P120	Pontos na escala graduada (0 mm...120 mm)
PTLD	Conjunto de pontos na superfície lateral direita
PTLE	Conjunto de pontos na superfície lateral esquerda
PTLF	Conjunto de pontos na superfície frontal
PTLT	Conjunto de pontos na superfície posterior
PTtopo	Conjunto de pontos na superfície de topo
Topo	Superfície de topo

