

Ensaaios da Ponte Internacional de Valença após a reabilitação dos pilares e fundações

Tests of the international bridge of Valença after the rehabilitation of piers and foundations

Pedro Oliveira
Xu Min
Luís Oliveira Santos
Pedro Campos

Resumo

A Ponte Internacional de Valença sobre o rio Minho, construída em 1886, é uma obra de arte metálica destinada ao tráfego rodoviário e ferroviário. Recentemente, com o intuito de prolongar a vida útil da obra e aumentar a segurança de circulação, foi efetuada uma intervenção profunda ao nível das fundações, dos pilares, dos aparelhos de apoio e do sistema resistente às forças horizontais.

Na sequência desta intervenção foram realizados ensaios de carga estáticos e ensaios de frenagem, com o objetivo de aferir o sucesso da reabilitação. Para esse efeito, na conceção dos ensaios e da instrumentação efetuada houve particular atenção à caracterização do comportamento dos pilares, dos aparelhos de apoio e dos dispositivos de absorção das forças horizontais.

Na presente comunicação, para além de uma breve descrição da obra e dos trabalhos de reabilitação, descrevem-se os ensaios realizados e apresentam-se os principais resultados obtidos, que permitiram caracterizar o comportamento da estrutura nas novas condições de funcionamento.

Abstract

The International Bridge of Valença over Minho River, built in 1886, is a metallic structure for road and railway traffic. Recently, a deep intervention was performed in its piers, foundations, bearings and horizontal restraining system, in order to increase its working life and safety.

Load tests and braking tests were performed to evaluate the efficiency of the rehabilitation. The study of the behaviour of piers, bearings and lockup devices was particularly taken into account during the planning of the tests, including the sensory system.

Besides a brief description of the structure and of the rehabilitation works, this article includes a detailed description of the load tests and braking tests performed, as well the presentation of the main experimental results. Some final remarks about the new structural behaviour of the bridge close the paper.

Palavras-chave: Ponte metálica / Reabilitação / Ensaios de frenagem / Dispositivos LUD

Keywords: Metallic bridge / Rehabilitation / Braking tests / Lockup devices

Pedro Oliveira

Bolseiro de Investigação
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
pmoliveira@lnec.pt

Xu Min

Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
xumin@lnec.pt

Luís Oliveira Santos

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
luis.osantos@lnec.pt

Pedro Campos

Engenheiro Civil
REFER
Lisboa, Portugal
pmcampos@refer.pt

1 Introdução

Projetada pelo engenheiro espanhol Pelayo Mancebo y Agreda, em 1879, a Ponte Internacional de Valença foi construída pela empresa belga *Braine le Comte* e inaugurada em 1886, constituindo a primeira ligação rodoviária e ferroviária entre a linha do Minho e a rede espanhola, substituindo as antigas barcas que faziam a ligação de pessoas e mercadorias entre Valença do Minho e Tuy [1]. Apesar dos 128 anos passados após a sua inauguração, a sua importância no sistema ferroviário continua a ser elevada, uma vez que permanece como a única travessia ferroviária do rio Minho.

A relevância económica da ponte, associada ao seu valor patrimonial, motivou uma intervenção profunda ao nível da sua infraestrutura e da sua mesoestrutura, de forma a incrementar a segurança e a funcionalidade da obra de arte.

Na sequência desta intervenção, foram realizados ensaios de receção, que incluíram uma componente estática e outra dinâmica, constituída por ensaios de frenagem, tendo em vista aferir a eficácia da reabilitação.

Assim, nesta comunicação, após uma breve descrição da estrutura e dos trabalhos de reabilitação realizados, descrevem-se os ensaios estáticos e de frenagem efetuados, referem-se os equipamentos utilizados e apresentam-se os principais resultados obtidos.

2 Descrição da obra de arte

A Ponte Internacional de Valença (Figura 1), com um comprimento total de 333 m, possui uma superestrutura constituída por uma viga metálica treliçada de rótula múltipla com cinco tramos contínuos, com vãos extremos de 63 m e vãos intermédios de 69 m.

As duas treliças verticais têm 6,60 m de altura, afastadas 5,50 m entre si, formadas por diagonais metálicas em perfil UNP200 e reforçadas por elementos verticais, em cada 6,00 m. Na zona de apoio, a viga é reforçada por perfis metálicos de alma cheia. Ao nível da corda superior situa-se o tabuleiro ferroviário enquanto ao nível da corda inferior está posicionado o tabuleiro rodoviário.

Os apoios extremos da ponte (PE1 e PE6) são fundados diretamente no granito e são constituídos por um corpo inferior em alvenaria aparelhada, vazado transversalmente e encimado por um arco de volta inteira que dá suporte ao tabuleiro rodoviário na sequência da superestrutura. Os pilares intermédios (P2 a P5) em cantaria têm cerca de 15 m acima do nível da água e estão fundados diretamente por *havage*.

Na sequência das obras de reabilitação das infraestruturas da ponte internacional de Valença, foram realizados ensaios de receção, que incluíram uma componente estática e outra com ensaios de frenagem.

do *havage* por um revestimento em betão armado, e a reparação dos pilares de alvenaria, por meio de colagem epóxi de algumas pedras quebradas e pelo preenchimento das juntas horizontais com argamassas branda de cal e ainda uma impregnação de proteção superficial.

Nesta intervenção foram também substituídos os aparelhos de apoio metálicos por aparelhos do tipo *pot*, fixo no pilar P3 e móveis nos restantes pilares. Por fim, mas de significativa relevância, foi introduzido um sistema de transmissão das forças de frenagem, através de dispositivos do tipo *lock-up device* (LUD).

4 Ensaios estáticos

4.1 Ensaios realizados

Os ensaios estáticos realizados visaram o estudo do comportamento da estrutura quando solicitada por sobrecargas significativas, nomeadamente dos elementos que tinham sido objeto da intervenção realizada: os pilares, as suas fundações e os aparelhos de apoio.

Os ensaios foram realizados com três composições, materializadas por uma locomotiva *Alshtom* da série 1900 e diversos vagões balastreiros de dupla tremonha. Numa primeira fase dos ensaios foi utilizada apenas a locomotiva, com peso total de 1146 kN, sucessivamente posicionada nas diversas secções de meio vão e de apoio intermédio (Figura 2). Apesar de não se tratar de uma carga pontual e unitária, os resultados assim obtidos permitiram a determinação experimental das linhas de influência das diversas grandezas observadas [4].

3 O reforço e reabilitação das infra-estruturas

A intervenção de reforço e reabilitação dos pilares e fundações desta obra de arte, pormenorizadamente descrita pelo seu projetista [2], envolveu a consolidação das fundações pela execução de uma cortina envolvente constituída por colunas de *jet-grout* com 0,80 m de diâmetro [3], a proteção da secção superior dos pegões (11 metros), substituindo-se as paredes metálicas dos caixotes



Figura 1 Ponte Internacional de Valença

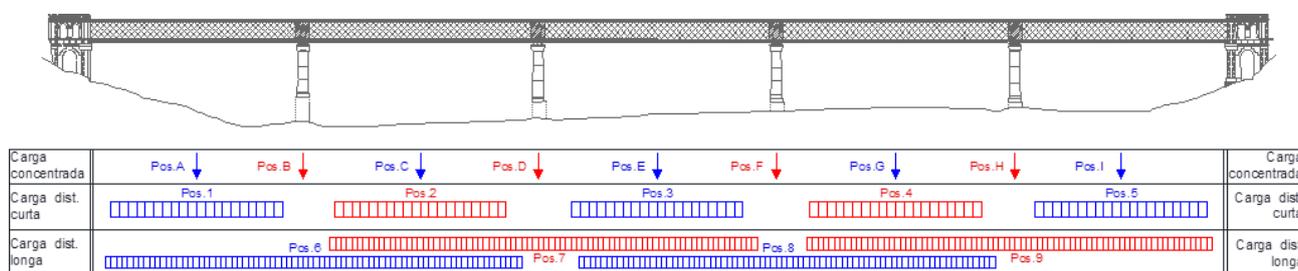


Figura 2 Ensaio estático: posições de carga

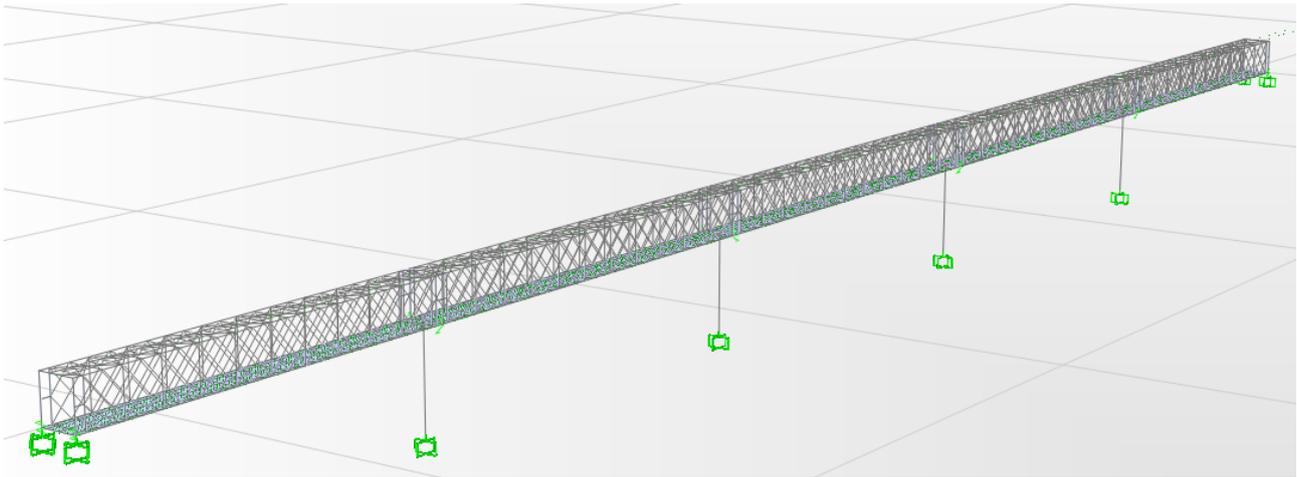


Figura 3 Modelo de cálculo

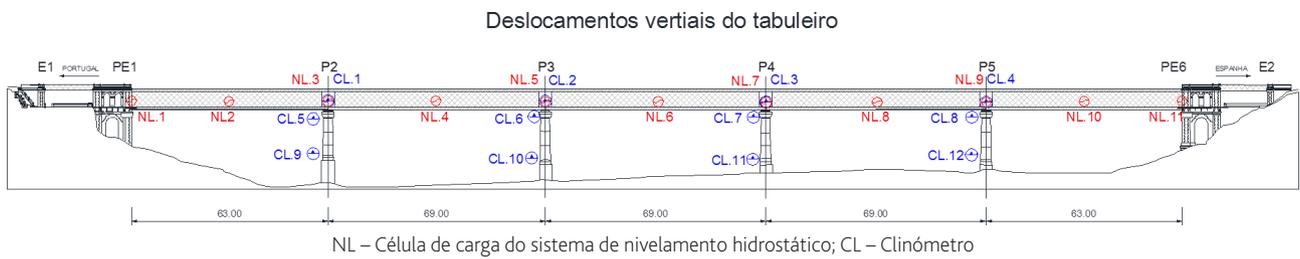


Figura 4 Instrumentação para o ensaio estático

Para os ensaios de carga distribuída foram utilizadas duas composições de carga: uma composição curta, constituída pela locomotiva e dois vagões balastreiros, com o peso total de 2658 kN, foi colocada sobre cada um dos tramos da ponte (Figura 2), de forma a maximizar o deslocamento vertical e o momento fletor na secção de meio vão desse tramo; uma composição longa formada pela locomotiva e seis vagões balastreiros (5682 kN) foi posicionada centrada sobre cada apoio intermédio (Figura 2), de modo a maximizar o momento fletor nessa secção e, principalmente, a carga vertical suportada pelo pilar.

O comportamento estrutural da ponte foi simulado através de um modelo numérico tridimensional (Figura 3), elaborado em SAP2000 [5], definido em função das características físicas e geométricas definidas no projeto.

4.2 Instrumentação

A instrumentação da ponte foi concebida de forma a caracterizar a resposta da ponte, em particular a sua infraestrutura. Nesse sentido, durante os ensaios estáticos foram medidos os deslocamentos verticais do tabuleiro, através de um sistema de nivelamento hidrostático, e as rotações no tabuleiro e nos pilares, por clinómetros elétricos bidirecionais (Figura 4).

A medição dos deslocamentos verticais visou, em primeiro lugar, o despiste do eventual assentamento de um apoio sob o efeito das cargas de ensaio. Desta forma, foi colocada uma célula de

pressão em todos os pilares, para além das células de referência nos encontros. Potenciando a instalação do sistema, foi também medida a flecha em cada tramo.

A medição de rotações foi realizada em três níveis dos quatro apoios intermédios. Com efeito, em cada pilar foi instalado um clinómetro junto à base, isto é, imediatamente acima do nível do rio, para medição de um eventual assentamento diferencial, um segundo sensor no topo do pilar e o terceiro clinómetro no tabuleiro sobre o pilar. Este par de sensores, para além medirem as rotações do topo do pilar e do tabuleiro, permite, por diferença, aferir o funcionamento do aparelho de apoio.

Durante os ensaios foi também medida a temperatura ambiente.

4.3 Resultados obtidos

Os carregamentos realizados apenas com a locomotiva permitiram a determinação de “linhas de influência” experimentais das diferentes grandezas medidas.

A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 5 a linha de influência do clinómetro instalado na carlinga de apoio sobre o pilar P3, bem como os valores correspondentes obtidos pelo modelo numérico.

Os carregamentos com as duas composições utilizadas permitiram obter as respostas de maior amplitude, como se exemplifica na Figura 6, na qual está representada a deformada da estrutura quando se encontrava carregado o tramo entre os pilares P3 e P4 (caso de

carga 3). De igual forma, na Figura 7 apresenta-se a deformada induzida pelo carregamento simultâneo dos tramos compreendidos entre os pilares P3 e P5 (caso de carga 8). Nestas figuras, bem como na generalidade dos valores medidos, sobressai uma boa correlação entre os valores medidos e calculados.

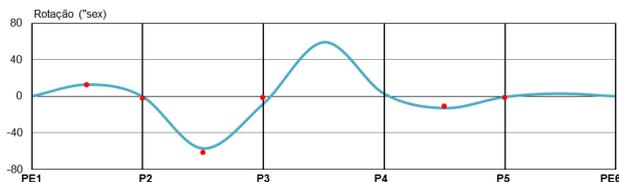


Figura 5 Linha de influência das rotações longitudinais no tabuleiro sobre o pilar P3 (CL02)

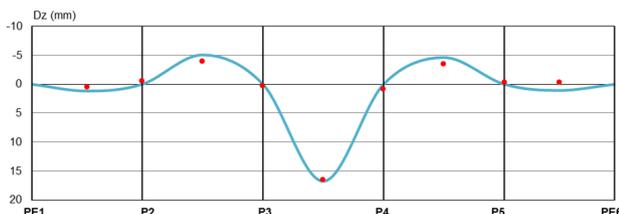


Figura 6 Deformada do tabuleiro sob o carregamento do tramo P3-P4 (caso de carga 3)

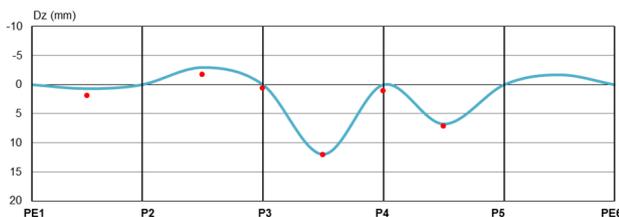


Figura 7 Deformada do tabuleiro sob o carregamento dos tramos P3-P5 (caso de carga 8)

Na Figura 8 estão representadas as rotações longitudinais medidas durante o caso de carga 6, quando se encontravam carregados os tramos compreendidos entre os pilares PE1 e P3. A rotação medida no topo do pilar P2 (-16"sex) será uma consequência do desaprumo deste pilar, já detetado antes da intervenção de beneficiação [2].

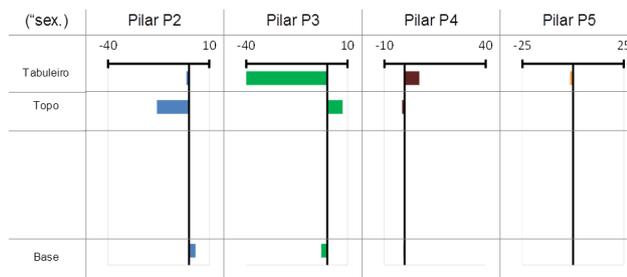


Figura 8 Rotações longitudinais medidas nos apoios intermédios (caso de carga 6)

Por outro lado, a rotação de 8"sex no topo do pilar P3, embora mais modesta, prende-se com o apoio fixo neste pilar. Por fim a elevada rotação no tabuleiro sobre este pilar explica-se pelo posicionamento das cargas.

5 Ensaios de frenagem

5.1 Ensaios realizados

Os ensaios de frenagem visaram a caracterização da resposta da estrutura quando solicitada a ações horizontais de frenagem, em particular dos componentes objeto da intervenção operada: aparelhos de apoio, pilares e, principalmente, os LUD. Estes ensaios consistiram na realização de frenagens de emergência, concretizados por duas composições distintas circulando a diferentes velocidades e em ambos os sentidos.

Foram realizadas duas séries de ensaios em que se utilizaram duas composições diferentes: a primeira constituída pela locomotiva e seis vagões balastreiros de dupla tremonha, com peso total de cerca de 5700 kN e um comprimento de 119 m; a segunda, formada pela locomotiva e onze vagões balastreiros, perfazendo um peso total de cerca de 9500 kN e um comprimento total de 202 m. Em cada série de ensaios foram efetuadas 3 frenagens em cada sentido, a partir das velocidades de cerca de 5 km/h, 40 km/h e 60 km/h.

Atendendo às significativas diferenças de comprimento e de massa das duas composições, bem como às diferentes velocidades, definiram-se diferentes pontos para o início da frenagem, de forma a maximizar o comprimento de frenagem sobre a ponte e, desta forma, induzir forças e acelerações horizontais significativas na estrutura.

Os ensaios foram realizados de noite, entre as 21h00 e as 4h00, de acordo com as possibilidades de interdição da via. Durante este período a temperatura do ar desceu progressivamente de 6 °C para 2 °C.

5.2 Instrumentação

A instrumentação realizada visou a quantificação das ações bem como a resposta da estrutura.

A quantificação da ação de frenagem foi realizada através da medição da aceleração da locomotiva, complementada pela medição das acelerações induzidas na estrutura. Para este efeito foram utilizados dois macrossismógrafos: no interior da locomotiva foi instalado um macrossismógrafo triaxial AC63 da GeoSIG, configurado para um campo de medição de 2,0 g; no tabuleiro foi usado um macrossismógrafo triaxial TitanSMA da Nanometrics, instalado na carlinga sobre o pilar P3, configurado para um campo de medição de 1,0 g. Ambos os macrossismógrafos possuíam GPS, o que permitiu a sincronização das acelerações. Foram também instalados acelerómetros uniaxiais ao longo do tabuleiro, tanto na direção vertical (AC.1.V), como longitudinal (AC.2.L e AC.4.L) ou transversal (AC.3.T), tal como representado na Figura 9.

Nesta figura estão também assinalados os restantes sensores utilizados na caracterização da resposta da estrutura: os clinómetros anteriormente referidos e doze transdutores magnetoestríticos

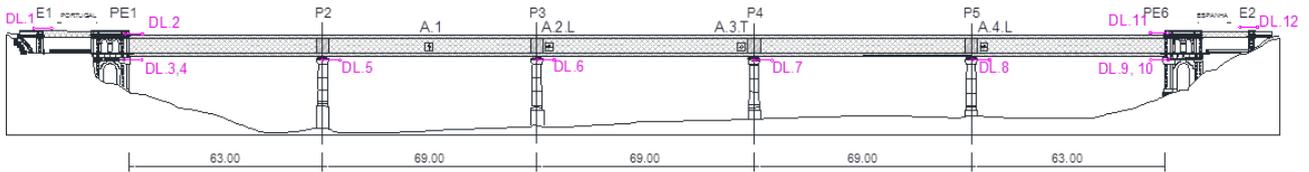


Figura 9 Instrumentação para o ensaio de frenagem

para medir a deformação dos quatro dispositivos LUD, bem como o deslocamento horizontal do tabuleiro relativamente aos pilares e aos encontros (Figura 9 e Figura 10).



Figura 10 Transdutores magnetoestrictivos

5.3 Resultados obtidos

5.3.1 Aceleração da locomotiva

Nestes ensaios o comboio iniciou a sua marcha a uma distância da ponte suficiente para estabilizar a sua marcha na velocidade pretendida. No ponto predefinido a locomotiva travou de forma brusca até se imobilizar completamente. Nas acelerações medidas no interior da locomotiva é possível distinguir claramente estas três fases do movimento do comboio: aproximação da ponte, frenagem e imobilização, como se pode observar no exemplo apresentado na Figura 11, registado durante a frenagem realizada com o comboio de 6 vagões circulando de Portugal para Espanha a uma velocidade de cerca de 40 km/h.

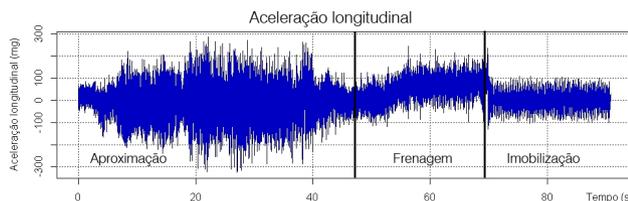


Figura 11 Acelerações no interior da locomotiva (1.ª série, 40 km/h, PT-ES)

5.3.2 Aceleração do tabuleiro

A análise das acelerações medidas no tabuleiro permite constatar a influência da velocidade de circulação do comboio de carga, quando se inicia a frenagem, na intensidade das acelerações longitudinais e verticais, induzidas pelas ações de frenagem (Figura 12). No entanto, pela comparação dos valores obtidos nas duas séries não se verifica uma influência significativa da massa do comboio.

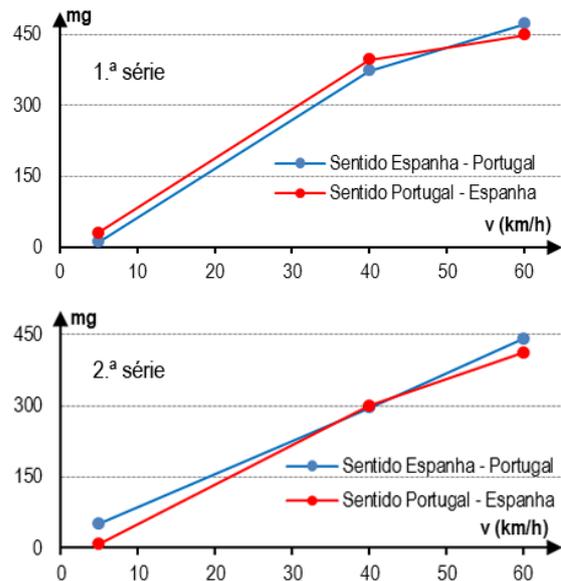


Figura 12 Aceleração longitudinal máxima em função da velocidade

As acelerações medidas durante a ocorrência de apenas ações ambientais permitiram obter algumas características dinâmicas da estrutura. Com efeito, através dos espectros de potência dos registos foi possível identificar as frequências dos primeiros modos principais de vibração da ponte: 2,01 Hz (transversal); 2,32 Hz (longitudinal) e 2,87 Hz (vertical) [9].

5.3.3 Deslocamentos longitudinais

Os deslocamentos longitudinais do tabuleiro foram medidos em diversos pontos da estrutura, nomeadamente nos pilares e nos dispositivos de transmissão de forças horizontais LUD.

Os dispositivos LUD possuem uma rigidez axial variável que é proporcional à velocidade de aplicação da carga [8]: para ações lentas tornam-se passivos, permitindo o livre movimento do tabuleiro; caso a ação seja brusca, bloqueiam esse movimento.

A Figura 13 ilustra o comportamento dos dispositivos LUD, sendo relativa a uma frenagem da 1.ª série, efetuada com o comboio a circular de Portugal para Espanha a cerca de 60 km/h. Nesta figura o deslocamento positivo corresponde ao alongamento dos LUD.

Da análise do conjunto dos resultados obtidos foi possível verificar que os LUD do lado em que o comboio entra na ponte têm

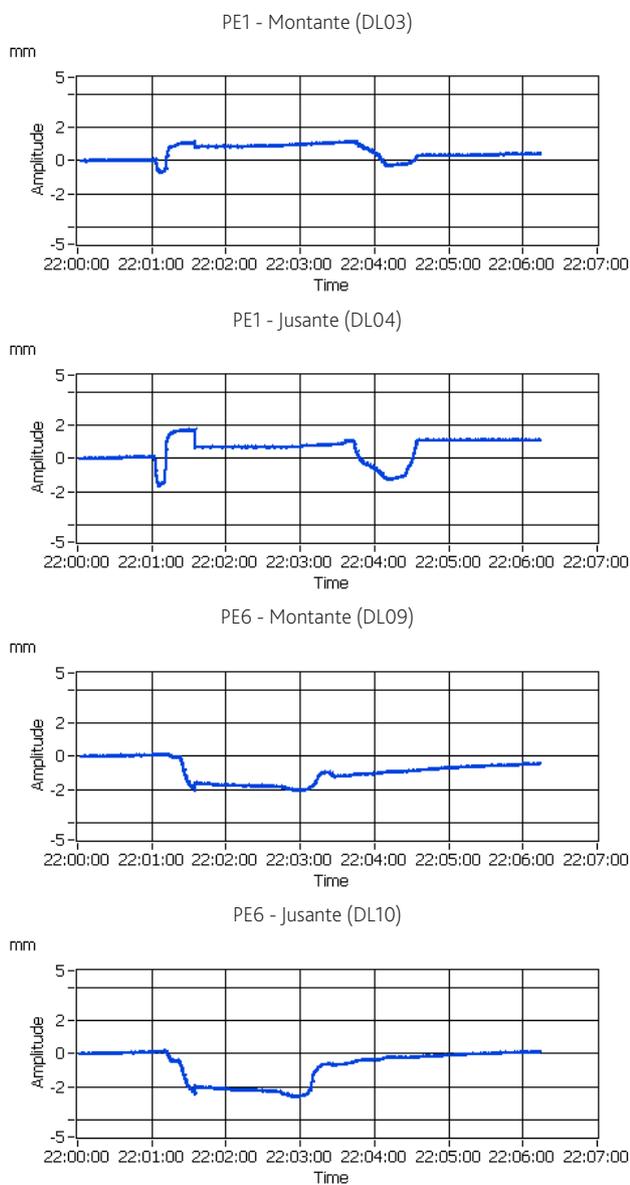


Figura 13 Deformação dos LUD durante a frenagem

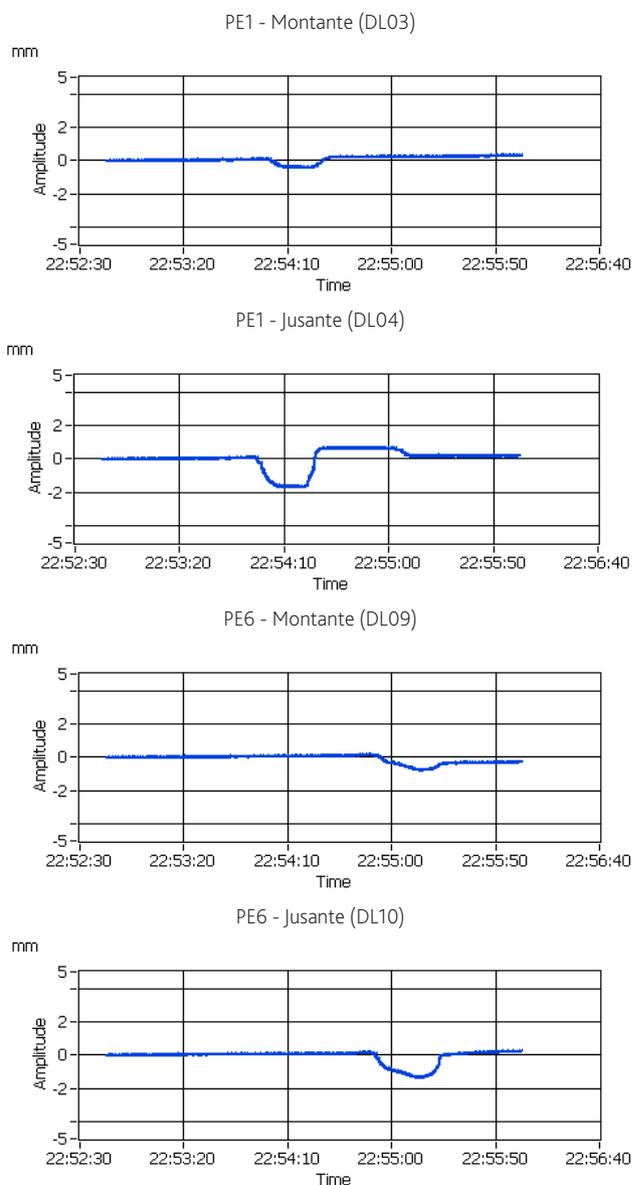


Figura 14 Deformação dos LUD durante a passagem do comboio do serviço regular

tendência a contrair durante a passagem do comboio e a alongar quando se efetua a frenagem. Esta contração dos LUD deve-se à flexão do tabuleiro devido à presença do comboio. Na fase inicial da frenagem, a deformação longitudinal dos LUD tem uma variação aproximadamente parabólica, característica do comportamento inverso entre a resposta do LUD e a velocidade de atuação da carga [9]. Os LUD do lado oposto, tendencialmente contraem durante a frenagem, com um ligeiro atraso em relação aos LUD do lado da entrada [9]. Durante os ensaios de frenagem com a velocidade de 60 km/h registaram-se valores máximos de encurtamento de 2,5 mm e de 1,7 mm de alongamento.

A Figura 14 foi obtida durante a passagem de Portugal para Espanha de um comboio do serviço regular a cerca de 18 km/h. Nestas circunstâncias, os LUD do lado da entrada do comboio contraíram instantaneamente devido à flexão do tabuleiro, enquanto os LUD do lado oposto apenas contraem quando o comboio se está a aproximar.

Após a frenagem ou a passagem do comboio sobre a ponte, os dispositivos do tipo LUD tendem a recuperar a sua posição inicial. No entanto, os intervalos entre os ensaios não foram suficientes para a recuperação total, pelo que as sucessivas frenagens provocaram a acumulação de deformações nos LUD e de movimentos do tabuleiro.

Na Figura 15 apresentam-se as deformações dos LUD, medidas nas pausas entre frenagens e passagens dos comboios, ou seja, quando a ponte se encontrava descarregada. Nesta figura, os traços verticais assinalam as horas a que se efetuaram as frenagens.

No final dos ensaios registou-se uma deformação acumulada de 15 mm nos LUD do lado de Portugal e de 20 mm do lado de Espanha. Tendo em conta a diminuição da temperatura durante o período dos ensaios, em cerca de 4 °C, parte da deformação registada está associada ao efeito térmico, e é estimada em 3,3 mm por tramo.

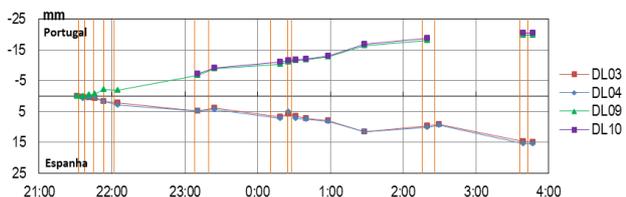


Figura 15 Deformações nos LUD ao longo do período dos ensaios

5.3.4 Rotações

Na Figura 16 estão apresentados graficamente os valores máximos e eficazes das rotações longitudinais medidas durante as ações de frenagem da 2.ª série.

Dos resultados apresentados constatou-se que o pilar P2 teve um comportamento dinâmico distinto dos restantes pilares, com valores máximos e eficazes, de um modo geral, superiores. Este acréscimo de rotação afigura-se associado ao desaprumo do pilar P2. É ainda possível verificar que o valor eficaz da rotação na base e no topo do pilar P2 são semelhantes, ao contrário do que sucede nos restantes pilares.

A rotação medida nos intervalos entre as frenagens também evidencia uma acumulação de deformação neste pilar (Figura 17),

ao contrário do que sucede nos restantes que apresentaram uma rápida recuperação das rotações induzidas pelas frenagens.

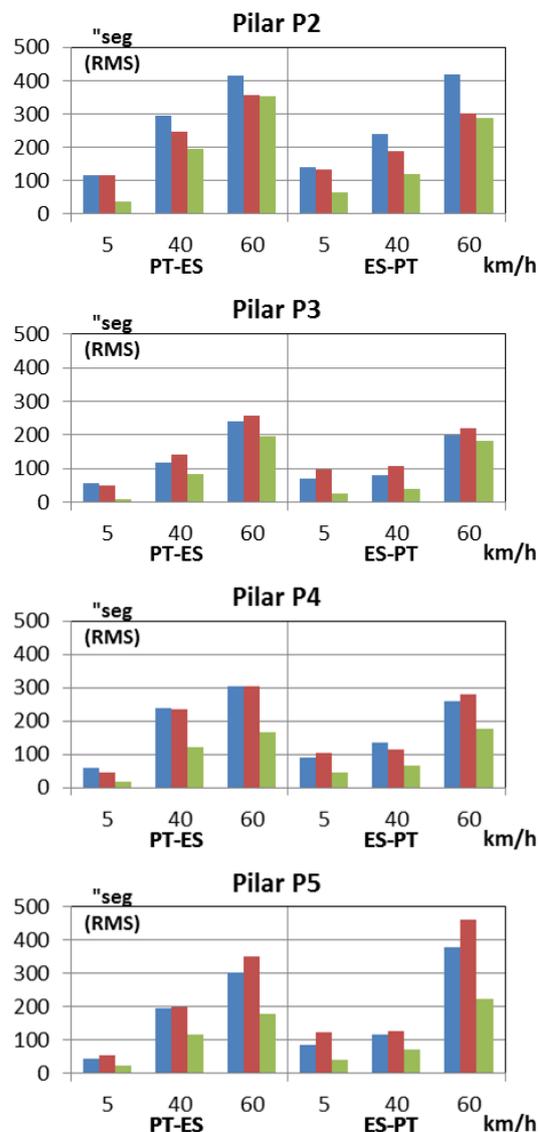


Figura 16 Rotações longitudinais máximas e eficazes – 2.ª série de frenagem

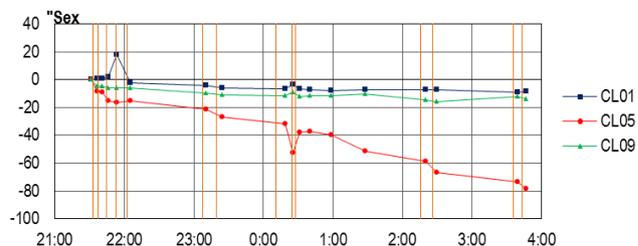


Figura 17 Rotações longitudinais medidas no pilar P2 ao longo do período dos ensaios

6 Conclusões

Na sequência das obras de reabilitação das infraestruturas da ponte internacional de Valença, foram realizados ensaios de receção, que incluíram uma componente estática e outra com ensaios de frenagem.

Durante os ensaios estáticos mediram-se os deslocamentos verticais do tabuleiro, as rotações no tabuleiro e a evolução da temperatura ambiente, tendo a estrutura evidenciado um comportamento elástico linear para o nível de cargas aplicado, verificando-se uma boa concordância entre valores medidos e calculados.

Os ensaios de frenagem tiveram por finalidade avaliar a resposta da estrutura sob ações horizontais, particularmente o comportamento dos aparelhos de apoio e do sistema de transmissão das forças de frenagem. Foram efetuadas frenagens com composições distintas, circulando nos dois sentidos com diferentes velocidades. Durante a realização dos ensaios foram medidas as rotações no tabuleiro e nos pilares, bem como os deslocamentos horizontais do tabuleiro relativamente aos seus apoios.

Os resultados obtidos permitiram verificar a existência de uma forte correlação entre a velocidade de circulação do comboio quando inicia a frenagem e o efeito dinâmico do comportamento da estrutura. Por outro lado, verificou-se que o aumento da massa do comboio não alterou de forma significativa o comportamento da estrutura.

As rotações medidas no pilar P2 indicam um comportamento diferenciado em comparação com os outros pilares, tendo acumulado maiores rotações no topo de pilar.

Observou-se nos dois encontros uma deformação assimétrica entre os LUD de jusante e de montante, que apresentam uma deformação menor.

Em síntese, os ensaios realizados permitiram a caracterização experimental do comportamento da estrutura após a intervenção realizada, aferindo a eficácia da solução implementada.

Agradecimentos

Ao Eng.º Miguel Guimarães, da Struconcept, Lda., autor do projeto de reabilitação e reforço das fundações, agradece-se a cedência dos ficheiros com os desenhos de dimensionamento geral e dos modelos de cálculo utilizados, que serviram de base a este trabalho, bem como o interesse com que acompanhou o planeamento e execução dos ensaios.

À Teixeira Duarte, nomeadamente aos colegas João Trindade e Silva e Rui Rodrigues, agradece-se o acolhimento dispensado, a colaboração e todo o apoio indispensável para a preparação e realização dos ensaios.

Finalmente, à firma Tecnilab agradece-se a cedência do macrossismógrafo triaxial TitanSMA da Nanometrics utilizado com sucesso no decurso dos ensaios de frenagem.

Referências

- [1] Santos, N. – *Conservação e Reabilitação de Pontes Metálicas*, Dissertação de Mestrado em Estruturas, Universidade do Porto, 1998.
- [2] Guimarães, M.; Teixeira, A. – *Reforço e reabilitação das infra-estruturas da Ponte Mista Internacional de Valença sobre o Rio Minho*, Segurança, Conservação e Reabilitação de Pontes. Ed. por P. Cruz, R. Calçada & T. Mendonça, ASCP, 2013.
- [3] Mimoso, M.; Caseiro, N.; Fernandes, J.; Xavier, B. – *Ensecadeira temporária para as obras de reabilitação e reforço das fundações da Ponte Internacional de Valença*, Segurança, Conservação e Reabilitação de Pontes. Ed. por P. Cruz, R. Calçada & T. Mendonça, ASCP, 2013.
- [4] Hirachan, J.; Chajes, M. – *Experimental influence lines for bridge evaluation*, *Bridges Structures*, Vol. I, No 4, pp. 405-412, December 2005.
- [5] CSI, SAP2000 – *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [6] EN 1991-2 – *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*, CEN, 2003.
- [7] UIC CODE 774-3 – *Track/bridge Interaction. Recommendations for calculations*, 2nd ed, 2001.
- [8] Taylor, D. – *Fluid Lock-up Devices – A robust means to control multiple mass structural systems subjected to seismic or wind inputs*, Taylor Devices, New York, 2012
- [9] Oliveira, P.; Xu M.; Santos, L.O. – *Ensaio de receção da Ponte Internacional de Valença após a reabilitação dos pilares e das fundações*, Relatório 193/2014, LNEC, 2014.

