



# Sbo

Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projeto à obra

#11, maio 2017

**Ponte Luiz I - reabilitação e monitorização**

Porto

Joaquim Figueiras  
Víctor Silva

**Editor**

Cadernos d'Obra

**Diretor**

Vitor Abrantes

**Coordenação Editorial**

Bárbara Rangel

**Comissão Editorial**

Abel Henriques

Ana Sofia Guimarães

António Silva Cardoso

Joaquim Poças Martins (presidente da OERN)

Paulo Conceição

Rui Faria

**Conceção Gráfica**

Incomun

**Textos**

Textos da autoria de Vítor Silva e

Joaquim Figueiras

**Créditos Fotográficos**

Autores e Metro do Porto.

Fig. 25. Coleção particular - Rui Romão

Fig. 26. Alvão, 1984

**Impressão**

Rainho e Neves

2.ª edição, julho 2018

3.ª edição, setembro 2019

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 500 exemplares

**Preço por número**

4,50 euros

**Publicação periódica**

n.º 11. Ano III, maio 2017

**Propriedade**

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

A iniciativa “Fora de Portas engenharia civil à mostra”, resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

**Editorial.** Na décima primeira edição da **Sebentas d'Obra** voltamos a estudar a intervenção realizada na Ponte Luiz I para permitir a passagem do Metro. Desta vez focamos a análise no processo de reabilitação e manutenção visto pelos olhos de quem a realizou, o Eng. Victor Silva da Metro do Porto e no processo de monitorização liderado pelo professor da FEUP o Eng. Joaquim Figueiras que tem vindo a ser feito desde esta intervenção.

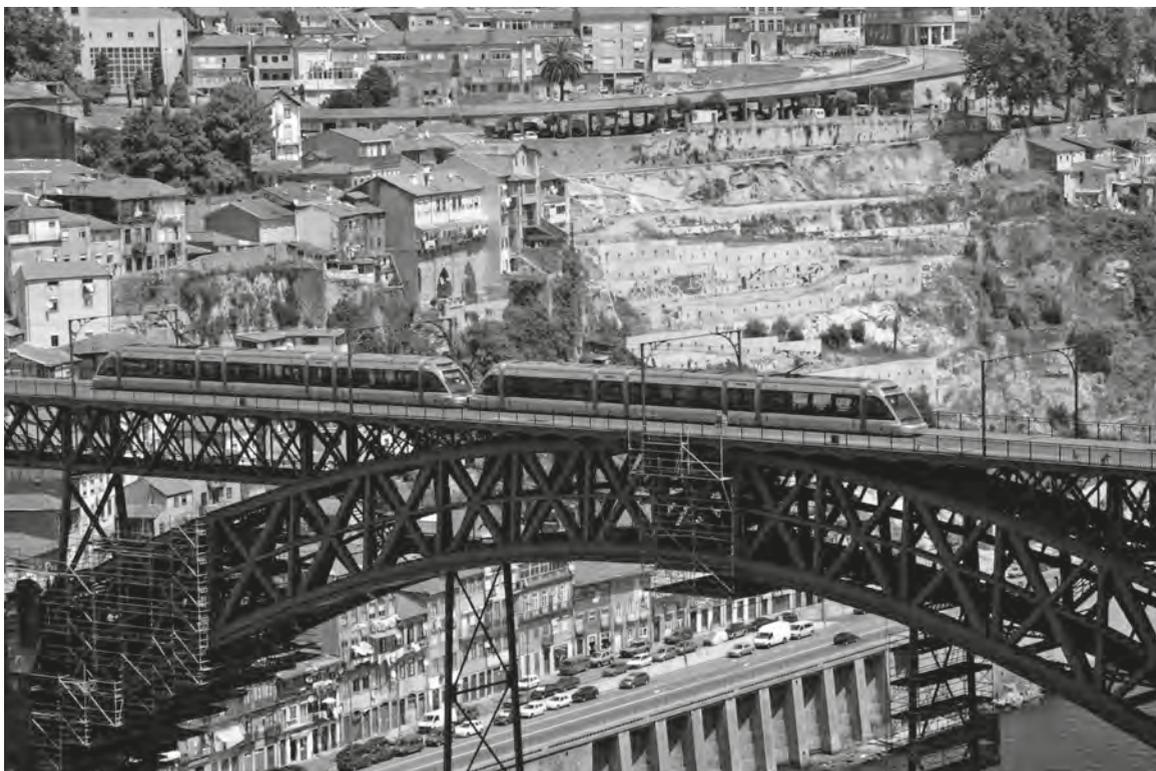
Do estudo de diagnóstico realizado também na FEUP, editado na sexta edição da *Sebentas d'Obra*, definiram-se as diretrizes de intervenção para garantir que a vibração causada pela passagem de um conjunto de carruagens a uma velocidade constante não danificasse a estrutura. O projeto de intervenção desenvolvido e construído pela Metro do Porto, envolveu um conjunto de ações que garantissem não só a sua eficácia futura mas que não alterasse de forma significativa a sua configuração e estrutura original. Estas duas premissas foram conseguidas. Hoje, quando se percorre a ponte ou se observa de uma das margens do Douro, não se consegue identificar onde foi feita essa intervenção. As avaliações que têm vindo a ser feitas pela equipa liderada pelo Eng. Joaquim Figueiras têm revelado que as alterações sofridas pela ponte na passagem do Metro ou quando se concentra um grande número de pessoas, não alteram o seu desempenho. Nesta edição revela-se como foram examinadas as vibrações da ponte causadas quer pela passagem da Meia Maratona, ou pela multidão que atravessa a ponte na noite de São João, demonstrando assim a eficácia desta grande estrutura.

Manutenção e monitorização do funcionamento em pontes, as obras de arte da Engenharia Civil, ou em qualquer infraestrutura ou edifício, são hoje áreas de saber em crescimento dentro das tarefas da Engenharia Civil. Tal como um carro, uma infraestrutura, que não é mais do que uma grande máquina, deve ser mantida e vigiada para que seja garantido o seu funcionamento de acordo com o seu uso. Estas novas tarefas do Engenheiro Civil, de enorme responsabilidade, serão a garantia de que as infraestruturas que compõem o conjunto das nossas cidades, não coloquem em risco a vida das pessoas que as utilizam todos os dias em segurança.

Na conferência, o Prof. Joaquim Figueiras revelará estes estudos onde nos explica como se processa esta vigilância. O Eng. Victor Silva mostrará como se processa a manutenção da ponte no dia a dia. Na visita ao passadiço técnico, entre o tabuleiro superior e o arco da ponte será possível entender a importância de cada peça, desta gigante estrutura articulada!

Bárbara Rangel  
Porto, 4 maio 2017

# Ponte Luiz I - reabilitação e monitorização



# A reabilitação do tabuleiro superior para o atravessamento do metro

A utilização do tabuleiro superior da Ponte Luiz I pelo metro requereu a sua adaptação e reforço, a que se juntou a reabilitação geral da restante estrutura, bem como o reforço ou substituição de alguns dos elementos metálicos da mesma, designadamente no arco e pilares.

A ponte Luiz I ao estar inserida na zona do centro histórico do Porto, distinguido pela Unesco com o título de Património Mundial, impunha que qualquer intervenção a levar a efeito teria obrigatoriamente de obedecer a regras muito restritas de modo a salvaguardar este património.

## O projeto

Considerou-se prioritário que a solução de reforço e beneficiação da obra não alterasse, no todo ou em parte, as características arquitetónicas da obra nem compromettesse a evidência da relação forma-função dos elementos estruturais da ponte.

Para o dimensionamento e verificação de segurança

estrutural da ponte foram usadas as ações regulamentares. Para a sobrecarga ferroviária considerou-se uma carruagem-tipo com quatro “bogies” em que cada “bogie” possui dois eixos. Foram consideradas composições simples ou duplas em uma ou ambas as vias. Foram ainda consideradas ações devidas aos efeitos associados às sobrecargas ferroviárias, nomeadamente as forças de lacete, de arranque e de frenagem.

## O reforço da estrutura

Toda a estrutura da Ponte Luiz I é uma estrutura articulada (“treliça”), conforme era tradicional em pontes da mesma época, constituída por barras de secção composta rebitada em geral formadas a partir de cantoneiras ou barras de secção retangular

Os estudos efetuados, mostraram que a utilização da Ponte Luiz I pelo Metro do Porto era possível. A sua adaptação passaria pela substituição integral do tabuleiro rodoviário existente por uma estrutura metálica, resultando numa redução da carga permanente e também proceder ao reforço generalizado das diagonais das vigas principais, de parte das diagonais de contraentamento dos pilares, dos montantes de suspensão e das diagonais no plano do arco.

Para o tabuleiro superior verificou-se ainda ser necessário a execução de reforço generalizado dos tramos centrais apoiados no arco e a substituição da viga de alma cheia existente na zona do fecho do arco, não só por esta apresentar resistência insuficiente mas também pela necessidade de interrupção das longarinas mais exteriores neste troço por embaterem no extradorso do arco.

No novo tabuleiro ferroviário manteve-se a posição das carlingas existentes que foram substituídas por

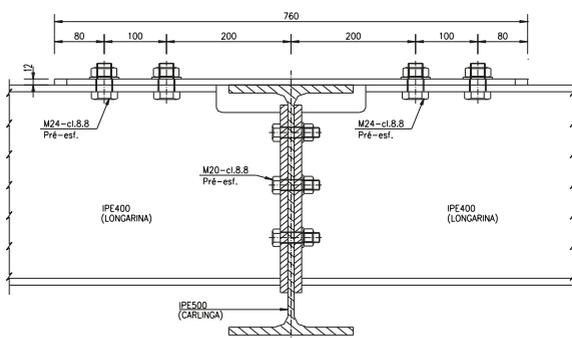


Fig. 1.

perfis IPE 500. As longarinas, em perfis IPE 400, têm continuidade total do banzo superior. Nas seções sobre as carlingas a continuidade é conseguida por cobrejuntas com ligações aparafusadas pré-esforçadas aos banzos superiores interrompidos (Fig. 1).

A ligação entre longarina e carlinga foi projetada conferindo ao tabuleiro um funcionamento de grelha. Para efeito da estabilidade das longarinas projetou-se um contraventamento secundário ao nível do seu banzo superior. De modo a absorver as ações de frenagem, existe um sistema de contraventamento horizontal em zonas localizadas do tabuleiro.

Para além da substituição do tabuleiro, propriamente dito, procedeu-se também ao reforço das diagonais e dos montantes das vigas principais de modo a reduzir a elevada esbelteza das peças existentes. Estes reforços foram efetuados com a colocação de cantoneiras ao longo de todo o comprimento das barras das diagonais e de perfis UNP65 nos montantes, ambas as peças ligadas

por intermédio de parafusos pré-esforçados classe 8.8 (Fig. 2, 3).

Nas seções mais esforçadas, sobre os apoios, o reforço das vigas principais foi efetuado por intermédio de chapas e, nas zonas próximas dos apoios, foram substituídos os contraventamentos horizontais, ao nível da corda inferior, bem como os contraventamentos verticais (Fig. 4).

### Arco

Embora a análise efetuada tenha indicado que não havia necessidade de reforço generalizado do arco, procedeu-se a reforços localizados das cordas e ao reforço das diagonais principais de modo a aumentar a estabilidade das barras. Também se procedeu à substituição das diagonais transversais de contraventamento vertical por perfis UNP260 (Fig. 5).

### Reforço dos pilares

O reforço dos pilares metálicos foi realizado com 2

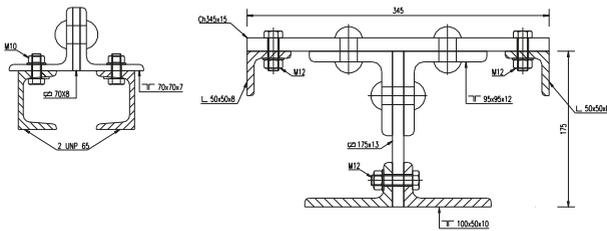


Fig. 2. Exemplo do reforço dos montantes do tramo 1.

Fig. 3. Exemplo das diagonais mais esforçadas com as cantoneiras de reforço.

Fig. 4. Exemplo do corte e reforço da corda superior da viga principal do tramo 13.

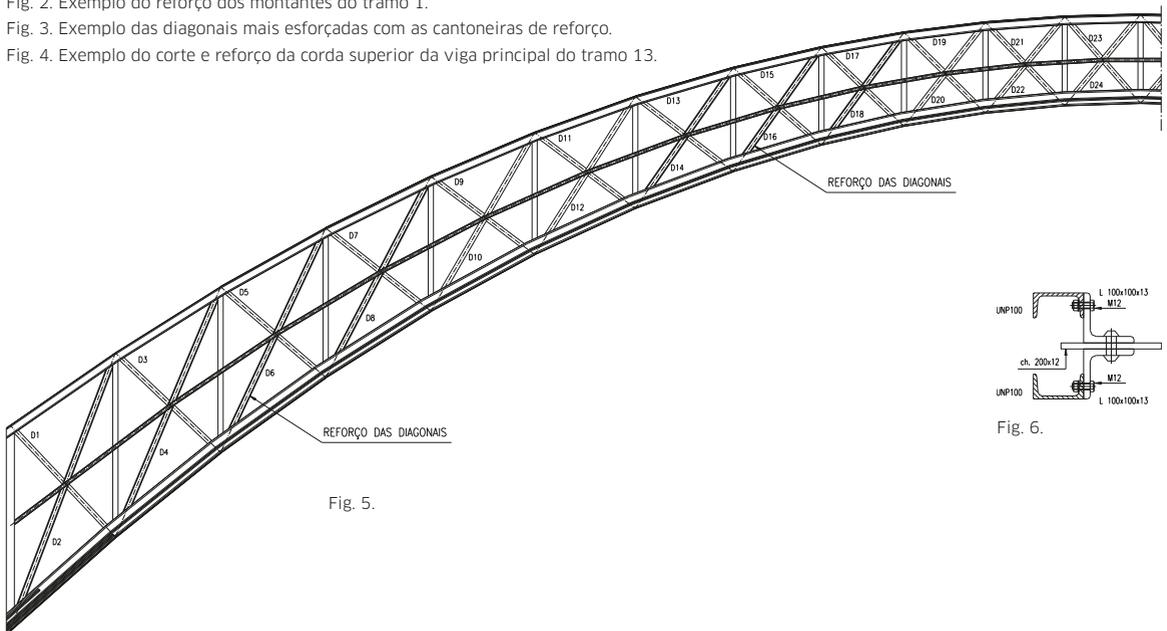
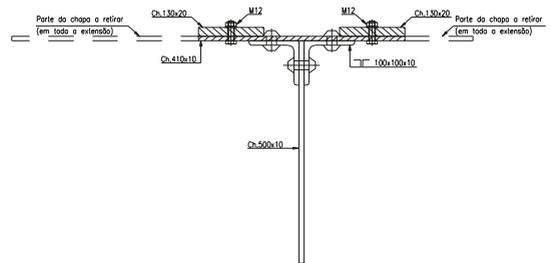


Fig. 5.

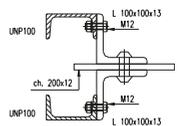


Fig. 6.

UNP100 nas diagonais de contraventamento a que se juntou a introdução de um novo contraventamento horizontal (Fig. 6).

### Durabilidade - vida útil da ponte

Na solução de reforço, a resistência à fadiga foi avaliada com base na metodologia prevista no EC3, incluindo o método de acumulação de danos. Para esse efeito foi considerado um volume médio de tráfego anual de aproximadamente 63 400 veículos em cada sentido.

### Revestimento do tabuleiro - veículos de emergência

Embora o tabuleiro superior da Ponte Luiz I se destine, em exclusivo à circulação de veículos do metro e pedonal, o projeto considerou, que a título excepcional e só em situações de emergência pública, o tabuleiro poderia ser utilizado por veículos de emergência.

Assim o projeto inclui uma estrutura com perfis e chapas de aço sobre a estrutura base do tabuleiro ferroviário, dimensionada para que os veículos de

intervenção rápida possam circular em situações de absoluta necessidade.

### Passeios

Para garantir uma utilização, sem restrições, do tabuleiro superior pelo metro e evitar “invasões” do canal do metro pelos peões, estudou-se o alargamento dos passeios para 1,70 m, solução esta que oferece condições de circulação pedonal aceitáveis e ao mesmo tempo não impõe alterações na imagem da ponte.

O tabuleiro superior da Ponte Luiz I, após a intervenção, ficou com uma largura útil de 9,8 m em vez dos 8,0 m do antigo tabuleiro rodoviário (Fig. 7-8).

### Aparelhos de Apoio e Juntas de Dilatação

A inspeção e análise efetuadas aos aparelhos de apoio revelaram que estes se encontravam em boas condições, excetuando os localizados nos encontros que foram substituídos por aparelhos de apoio novos.

As juntas do tabuleiro “rodoviário” foram substituídas (Fig. 9).

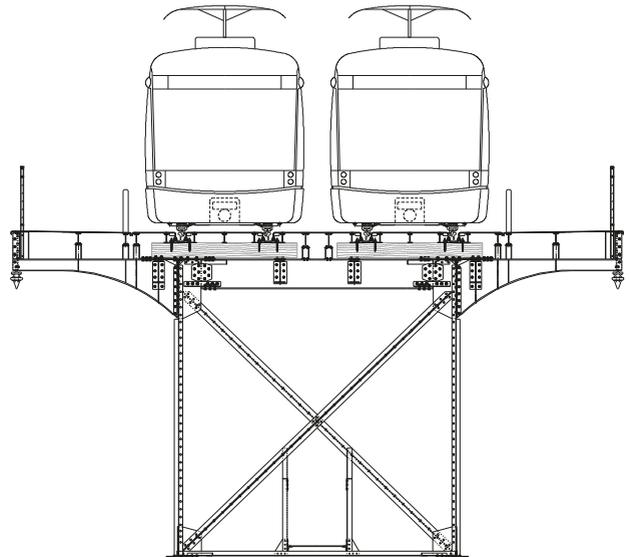
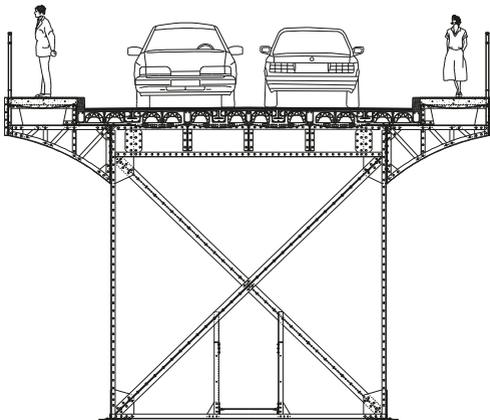


Fig. 7. Tabuleiro Existente (8,0 m).

Fig. 8. Corte transversal do tabuleiro (9,8 m).

Fig. 9.



## A obra

O tabuleiro superior da Ponte Luiz I foi encerrado ao trânsito a 27 de junho de 2003.

A particularidade da intervenção e a necessidade permanente de se proceder à validação das soluções a implementar, quer no que respeitava às peças a substituir, quer nas reparações a efetuar face às patologias existentes, levou a que, no âmbito da assistência técnica à obra, estivesse em obra um engenheiro da equipa de projeto com afetação a 100%.

De uma forma simplificada as atividades desenvolvidas foram: montagem de andaimes, demolição do tabuleiro superior, substituição e reforço da estrutura, substituição de peças corroidas, decapagem, pintura, instalação da via-férrea e desmontagem dos andaimes.

## Andaime

A primeira das atividades principais foi a instalação de uma estrutura de andaime através da qual se pudesse aceder a todas as zonas da ponte para efetuar os trabalhos

de reforço e reabilitação e posteriormente à realização destes trabalhos o andaime foi coberto com uma lona para permitir os trabalhos de decapagem e pintura.

A estrutura do andaime foi calculada tendo em atenção o peso próprio dos componentes do andaime e a sobrecarga de utilização que consistiu numa carga repartida de  $3 \text{ kN/m}^2$  colocada ao nível da plataforma mais desfavorável à qual foi adicionado o peso de sete pessoas.

Relativamente ao vento foram considerados dois casos de carga: o vento de serviço aplicado ao andaime sem lona e com sobrecarga de utilização, e o vento máximo aplicado ao andaime coberto e sem considerar a sobrecarga. Foi ainda considerada uma carga devida a imperfeições de montagem.

A montagem dos andaimes incluiu também a estrutura de proteção do tabuleiro inferior que foi particularmente importante para permitir efetuar o reforço nos montantes de suspensão.

O peso total da estrutura de andaimes colocada foi aproximadamente de 1450 ton (Fig. 10).



Fig. 10.

### O processo e faseamento construtivo

O reforço estrutural foi efetuado tendo em atenção a sequência de operações e os condicionamentos indicados no projeto. Todas as atividades de reforço foram efetuadas garantindo sempre as condições de segurança estrutural.

A demolição da laje do tabuleiro superior foi realizada por fases e com os cuidados necessários para não danificar os elementos estruturais a manter (Fig. 11).

A grelha metálica de suporte à laje de betão foi desmontada garantindo-se sempre que não seriam removidos mais de 12 m sem que se procedesse à substituição das longarinas e carlingas desse tramo (Fig. 12-13).



Fig. 11.

Fig. 12. Tabuleiro rodoviário existente.

Fig. 13. Tabuleiro ferroviário.

Os contraventamentos, quer no tabuleiro quer no arco, foram substituídos barra a barra, mantendo-se sempre pelo menos uma diagonal colocada ou um sistema de ligação provisória entre os nós.

As patologias encontradas durante a execução dos trabalhos foram “descobertas” em três fases: a primeira fase correspondeu à inspeção feita “in loco” após a montagem dos andaimes; a segunda fase, após a decapagem, onde se constatou que havia peças que estavam fissuradas e com grau de corrosão mais acentuado que o levantamento anterior deixara antever; a terceira fase, na pintura, com a aplicação do primário, em que foram reveladas fissuras que anteriormente não eram visíveis (Fig. 14).

### Corrosão

Os elementos metálicos que apresentavam corrosão acentuada foram integralmente substituídos, no âmbito do reforço previsto ou devido ao seu estado de degradação. Nas situações em que a corrosão era localizada

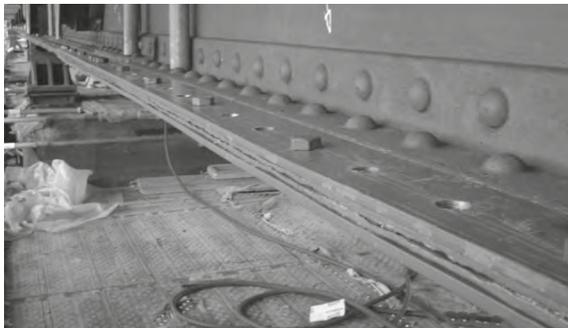
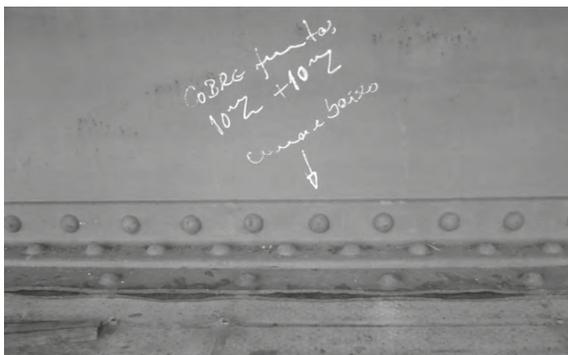


Fig. 14.

e não obrigava à substituição integral do elemento, este foi objeto de tratamento – decapagem e pintura. A corrosão verificada entre chapas de uma mesma seção também levou à reparação destes elementos, quer através da colocação de chapas de cobre-juntas, quer com a aplicação de rebites em falta ou suplementares.

### Fissuração

Todos os elementos metálicos em que se observou fissuração foram substituídos. Algumas destas anomalias só se revelaram após a aplicação do primário da pintura, o que obrigou a substituir esses elementos antes de se prosseguir com a pintura (Fig. 15).

### Rebites

Foram aplicados rebites em várias situações das quais se destacam a ligação de peças novas a nós rebitados existentes, a substituição de rebites danificados ou em

falta e as zonas de reforço por adição de chapas metálicas.

A cravação dos rebites foi feita manualmente e a quente. O aquecimento dos rebites foi efetuado em fornos elétricos, de modo a obter uma temperatura uniforme ao longo da espiga do rebite que se manifesta ao atingir uma cor incandescente (Fig. 16).

### Pintura

Na seleção do processo de decapagem da ponte foram tidos em consideração os aspetos ambientais, realizando-se uma gestão controlada de todos os resíduos resultantes, de forma a minimizar os impactos que inevitavelmente lhe estavam associados.

A manutenção da circulação de automóveis e de peões no tabuleiro inferior da ponte, durante todas as fases dos trabalhos requereu cuidados especiais de proteção e em especial na fase de pintura do arco e tabuleiro superior.

A preparação das superfícies do aço existente e a



Fig. 15.

Fig. 16.

Fig. 17.

manter foi realizada por hidrodecapagem a Ultra Alta Pressão (UHP).

O sistema de retenção dos resíduos de hidrodecapagem era constituído por duas zonas: uma de contenção lateral e superior e outra de retenção e recolha de fundo,



Fig. 18-20.

com bordos verticais de 1,0 m de altura, ligada a um sistema coletor dos efluentes à unidade de tratamento.

A limpeza dos resíduos secos foi realizada quer por meios manuais quer recorrendo a sistema de aspiração industrial.

O esquema de pintura utilizado foi: primário (vermelho óxido) – uma demão geral com 120 microns; intermédio (cinzento claro) – uma 2.ª demão geral com 110 microns; e acabamento (cinzento grafite) – uma demão geral com 75 microns. A utilização destas três cores permitiu conferir a olho nu a fase em que estava a pintura e garantir que eram aplicadas todas as demãos previstas.

A pintura foi realizada por projeção “air-less” com jacto fino e regular (Fig. 17, 18).

### Via

O assentamento da via-férrea foi feito sobre travessas em madeira de Azobe, espaçadas de 0,75 m. A via é constituída por carril 35 GP e um sistema anti vibratório de tipo ASP, fixado sobre as travessas em madeira, caracterizado por um amortecimento de 10 dB a 63 Hz (Fig. 19, 20).

### Vigas de bordo

As vigas de bordo dado o seu estado de degradação, foram substituídas tendo-se aproveitado e reabilitado os elementos decorativos de modo a manter integralmente o aspeto da ponte (Fig. 21).



Fig. 21.

## Guarda corpos

Procedeu-se à substituição integral do guarda corpos, mantendo o painel decorativo após recuperação do mesmo (Fig. 22).

## Iluminação pública do tabuleiro superior

A escolha da nova iluminação, para os percursos pedonais, não podia abstrair-se da singularidade da ponte, enquanto objeto notável da engenharia e da arquitetura do século XIX, e do seu impacto na paisagem patrimonial do Porto.

A escolha da iluminação teve três ideias orientadoras: iluminação baixa distribuída por todo o tabuleiro, reforço e diferenciação entre a zona pedonal e o canal do metro ligeiro e a criação de efeito cénico, tanto ao nível da circulação no próprio tabuleiro superior, que se assemelha ao de uma pista aeroportuária, como para quem vê a ponte a partir da sua envolvente mais próxima marcando o limite superior da ponte por um conjunto de pontos de luz que intensificam a perceção da sua extensão.

A nova iluminação instalada, no tabuleiro superior da ponte, renovou o interesse daquela obra na paisagem urbana, das cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia, tornando-a um *ex-libris* das imagens noturnas das zonas ribeirinhas.

## Pórticos da catenária

Os pórticos existentes não eram compatíveis com o alargamento do tabuleiro, tendo-se procedido à substituição integral dos mesmos, mantendo o seu desenho e havendo o cuidado da sua localização coincidir com os alinhamentos definidos pela modelação da própria estrutura.



Fig. 22.

## Segurança

O desafio da segurança em obra foi garantir o atravessamento pedonal e rodoviário no tabuleiro inferior e a navegabilidade de embarcações no rio, ao mesmo tempo que os trabalhos de reforço e reabilitação da ponte decorriam, o que obrigou à adoção permanente de medidas de segurança individuais e coletivas que garantissem a segurança das pessoas e bens envolvidos de um modo direto, caso dos trabalhadores, e indireto, no caso dos visitantes e utilizadores do tabuleiro inferior e do rio.

Fruto do empenho de todos e das medidas impostas foi possível concluir toda a intervenção sem registo de acidentes graves.

A 17 de setembro de 2005 a ponte foi aberta à circulação pedonal e ferroviária.

## Ficha técnica

Dono da obra: Metro do Porto S.A. Fiscalização: Consórcio CGK. Empreiteiro: ACE Normetro. Projeto: GRID - Consultas, Estudos e Projectos de Engenharia Lda. Execução dos trabalhos: Sociedade de Construções Soares da Costa S.A. Andaimos: ULMA - Construcción. Estrutura metálica: SIMI - Soc. Internacional de Montagens Industriais, S.A. Pintura: EURONAVY - Tintas Marítimas e Industriais, S.A. Instrumentação e Monitorização: LABEST - FEUP.

Materiais: aço, 1.000 ton. (110 ton em patologias); aço substituído, 350 ton; rebites, 28 400; horas trabalhadas, 578 652; custo total da intervenção, 11,6 M€.

# Monitorização da Ponte Luiz I

## 1. A obra

A Ponte Luiz I é constituída por um arco metálico duplamente rotulado, com uma corda de 172 m e uma flecha de 45,1 m, apresentando uma espessura aparente variável de 16,7 m junto aos apoios e de 7,1 m no coroamento. Esta espessura varia segundo uma forma parabólica tanto no plano vertical como em planta.

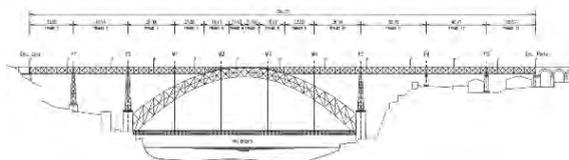
O arco é constituído por 2 cordas na face de extradorso e outras duas na face de intradorso, repartidas pelos alinhamentos de montante e jusante. No plano vertical, diagonais dispostas em X e montantes verticais perfazem a ligação entre as cordas de intradorso e extradorso, enquanto travessas e diagonais horizontais e transversais contraventam horizontalmente as faces montante e jusante do arco, delimitando deste modo células designadas de aspas. Estas não são mais do que hexaedros semelhantes a cubos, cujas arestas são materializadas pelas cordas do arco, montantes verticais e travessas e cujos vértices são unidos nas faces por diagonais cruzadas.

O tabuleiro superior possui uma largura útil de 9,81 m e um desenvolvimento total de 391,25 m entre eixos de aparelhos de apoio nos encontros, vencendo 13 vãos entre apoios. Duas grelhas independentes transmitem as sobrecargas à estrutura resistente do tabuleiro, concretizada por duas vigas-treliça contínuas, sendo estas apoiadas pelo coroamento do arco, por sete pilares e dois encontros. Uma das grelhas é constituída por perfis metálicos e transfere as sobrecargas de carácter não ferroviário às cordas e longarinas superiores do tabuleiro, enquanto a outra é materializada pelos carris metálicos e travessas em madeira de azobe e transmite as cargas provenientes dos veículos do metro.

O tabuleiro inferior apresenta uma largura útil total de 8 m, sendo 5,75 m ocupados pela faixa de rodagem rodoviária e 2,25 m destinados aos dois passeios localizados a montante e jusante. As sobrecargas são transmitidas a uma grelha metálica através de um pavimento

em betão aligeirado, em tudo idêntico ao existente no tabuleiro superior antes dos trabalhos de reabilitação e reforço. O tabuleiro com 174 m de comprimento é suspenso do arco por 4 montantes de suspensão que delimitam os três tramos interiores de 36 m e os dois tramos de extremidade com 33 m. Nas extremidades, junto aos arranques do arco, as vigas-treliça apoiam-se em aparelhos de apoio metálicos que permitem rotações e deslocamentos longitudinais.

Dos sete pilares que apoiam o tabuleiro superior, cinco são metálicos e dois em alvenaria de granito, materializando estes as penúltima e antepenúltima linhas de apoio da margem norte. Dois dos cinco pilares metálicos alinham com os montantes de suspensão extremos,



permitindo o apoio do tabuleiro superior sobre o arco, enquanto os restantes assentam em bases de alvenaria nas margens do rio Douro.

### A monitorização estrutural de obras de arte

As pontes são componentes críticos da rede de transportes que asseguram a prosperidade económica e a qualidade de vida. Estão, no entanto, sujeitas às condições ambientais e aos efeitos operacionais que degradam o seu desempenho e durabilidade podendo levar à danificação e ao colapso. Para manter as obras seguras e funcionais é fundamental proceder à sua vigilância e conservação. A monitorização da integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) tem vindo a impor-se como uma ferramenta essencial para as atividades de gestão e manutenção de pontes. O principal propósito de um sistema SHM é proporcionar informação objetiva e em tempo útil acerca do estado da estrutura e alertar no caso de ocorrência de dano (Fig. 23).

Na monitorização estrutural, a medição das grandezas

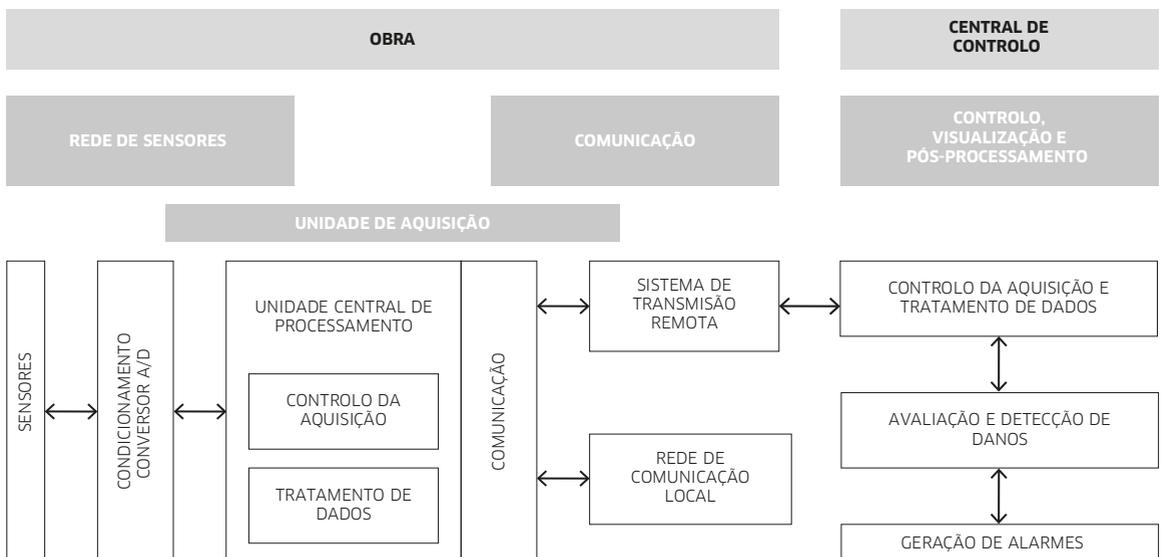
relevantes pode ser realizada em permanência com recurso a sistemas que fazem parte integrante da obra, medindo, interpretando e sentindo a estrutura. Os elementos que constituem os sistemas de monitorização podem ser agrupados em: (i) rede de sensores, (ii) unidades de aquisição de dados, (iii) unidade de comunicação, e (iv) controlo, visualização e pós-processamento (Fig. 24.).

Esta publicação ilustra a experiência da FEUP-LABEST aplicada ao serviço da Ponte Luiz I, consolidada ao longo dos últimos 15 anos de investigação e desenvolvimento na área da Engenharia SHM, complementada pelo empreendedorismo mais recente da NewMENSUS. Apresenta-se aqui o trabalho efetuado para apoiar o desenvolvimento do projeto de reabilitação, o controlo efetuado no decorrer dos trabalhos de reconstrução do tabuleiro superior, bem como a avaliação do desempenho da obra reabilitada. Ilustra-se a implementação de um sistema de monitorização inovador baseado na tecnologia das fibras óticas para assistir na vigilância permanente da nova vida da obra. Ficam realçadas as potencialidades dos novos sistemas de monitorização na atualidade da Engenharia Civil.



## 2. Referência Histórica à Ponte Luiz I

A necessidade urgente de substituição da Ponte Pênsil por questões de segurança, decidida em reunião da Câmara Municipal do Porto em fevereiro de 1876, conduziu à abertura de um concurso internacional de conceção de uma nova ponte sobre o Rio Douro que



permitisse estabelecer a ligação entre o Porto e Gaia a diferentes cotas, aproveitando a topografia das encostas. Foi designada Ponte Luiz I, como assinala a placa sobre o portal do tabuleiro inferior. O projeto é da autoria de Théophile Seyrig, engenheiro belga discípulo de Gustave Eiffel, tendo a obra sido adjudicada à Société Anonyme de Constructions et des Ateliers de Willebroeck em 27 de maio de 1881. Inaugurada oficialmente em 31 de outubro de 1886 a Ponte Luiz I constituiu um marco na história das obras de arte edificadas em Portugal, solucionando a dupla ligação entre as duas margens do Douro, uma ao nível superior (cota alta) e outra ao nível das zonas ribeirinhas do Porto e de Vila Nova de Gaia (cota baixa). A solução estrutural, na linha do que a Casa

Eiffel já nos tinha habituado com a vizinha Ponte Maria Pia, inclui variantes arrojadas, patentes por exemplo na suspensão do tabuleiro inferior a partir do arco, que evidenciam mais uma vez o génio do projetista Théophile Seyrig (Fig. 25).

A Ponte Luiz I tem estado em operação contínua desde outubro de 1886, tendo servido essencialmente o tráfego rodoviário entre as cidades do Porto e Vila Nova de Gaia. Desde então foi sujeita a diferentes intervenções de reabilitação e sofreu pequenas alterações de modo a acomodar a passagem de novos tipos de veículos. Antes de qualquer intervenção, testes de carga são reportados terem sido efetuados para avaliar a integridade da obra e o desempenho estrutural de componentes específicos. As primeiras provas de carga foram realizadas em agosto de 1886 justamente antes da abertura ao tráfego do tabuleiro superior.

Em 1930, foram executados testes de carga estáticos e dinâmicos para estudar a viabilidade de instalação no tabuleiro superior de duas linhas para o atravessamento simultâneo de carros elétricos. As cargas foram realizadas usando dois carros elétricos com atrelados. Os carros foram carregados com peças de ferro (carga total de 14 tons cada) e os atrelados com areia (carga total de 15 tons cada) (Fig. 26).

Em 1954 o pavimento, quer do tabuleiro superior quer do inferior, foi substituído por uma solução de pavimento mais leve (menos uma tonelada por metro linear) de modo a garantir um grau de segurança idêntico para o tráfego de veículos mais pesados. O engenheiro



< Fig. 23. Colapso da Ponte Hintze Ribeiro em Entre-os-Rios em março de 2001.

< Fig. 24. Esquema geral de um sistema de monitorização de uma obra de arte.

Fig. 25. Ilustração de duas fases de construção da Ponte Luiz I. Na foto de cima ainda é possível observar a Ponte Pênsil.

Fig. 26. Carro elétrico atravessando o tabuleiro superior, nos anos trinta.

responsável por esta intervenção (Prof. Edgar Cardoso) assinalou a grande importância de se realizar testes de carga antes e depois dos trabalhos de reabilitação do pavimento. A substituição do pavimento foi realizada, mas os testes nunca foram executados.

Recentemente com a decisão de integrar o tabuleiro superior da Ponte Luiz I na infraestrutura da rede do Metro do Porto, um conjunto de inspeções e estudos foram levados a cabo e veio ao de cima a importância da monitorização do seu comportamento experimental (Fig. 27, 28). O Laboratório de Estruturas (LABEST) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) foi encarregado deste trabalho. Em 2002, foi instalado um sistema que permitiu observar o comportamento estrutural durante um ensaio de carga e monitorizar durante um certo período o efeito da variação ambiental da temperatura. Os resultados obtidos permitiram o ajuste e a validação de modelos de comportamento estrutural de grande importância para a concretização do novo projeto

de reabilitação do tabuleiro superior. Este sistema de monitorização foi depois reformulado com o objetivo de avaliar e controlar os efeitos estruturais dos trabalhos de reabilitação do tabuleiro superior. No final dos trabalhos de reabilitação foi realizado novo ensaio de carga, em condições idênticas ao anterior, para avaliar a nova condição estrutural da obra. Um sistema de monitorização inovador, baseado na tecnologia das fibras óticas, foi então implementado de forma permanente na Ponte Luiz I para permitir examinar o desempenho em serviço e segurança desta ponte centenária na sua nova missão.

Mais de um século após a sua inauguração, e depois de sucessivas recomendações expressas em diversos relatórios de inspeção alertando para a necessidade, ou mesmo para a emergência, de uma maior atenção à segurança e ao estado de conservação da Ponte Luiz I, este magnífico exemplar do património mundial da UNESCO tem à sua disposição um sistema de monitorização especialmente desenvolvido para o efeito.

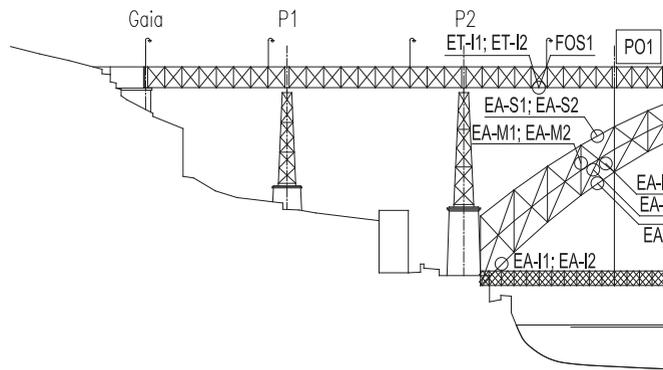
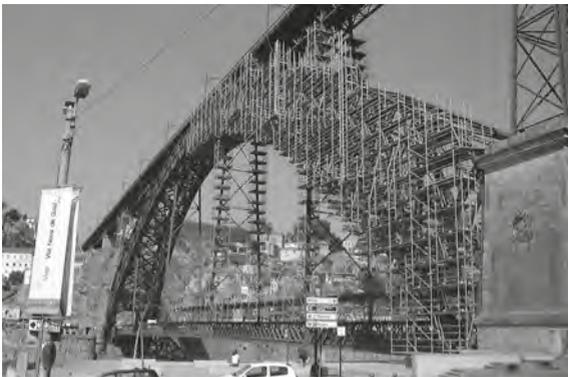


Fig. 27. Vista geral da Ponte Luiz I (vista de jusante) no início século XXI.

Fig. 28. Montagem de andaimes de suporte à inspeção e levantamento para o projeto de reabilitação

Fig. 29. Localização das secções onde foram instalados extensómetros para medição das deformações

### 3. Observação e Ensaio para a Reabilitação

Como referido, para verificar a condição de funcionamento estrutural da ponte foi instalado um sistema de monitorização temporário para apoiar a realização de dois ensaios de carga. Um ensaio foi efetuado antes dos trabalhos de reabilitação para apoiar o desenvolvimento do projeto, e outro ensaio foi realizado no final dos trabalhos com vista à verificação da conformidade da reabilitação efetuada. Parte deste sistema de monitorização (deformações e temperaturas) serviu ainda para vigiar a obra durante a execução dos trabalhos.

A observação do comportamento da ponte durante os ensaios de carga foi orientada para a medição de: (i) deformações em elementos selecionados da treliça do arco e do tabuleiro superior, (ii) deslocamentos verticais a meio de quatro vãos do tabuleiro superior e no coroaamento do arco, e de deslocamentos horizontais das juntas de dilatação nos encontros, (iii) temperaturas ambiente e no aço em quatro zonas diferentes do tabuleiro. Foi instalado um sistema de monitorização que fornecia a leitura simultânea e automática de todos os sensores a uma frequência pré-determinada. A instrumentação foi baseada em sensores elétricos, embora experimentalmente tivessem sido instalados alguns sensores de deformação e de temperatura em fibra ótica para avaliar o seu desempenho em obra (Fig. 29).

A aplicação dos extensómetros foi particularmente dificultada pelas condições de acesso aos locais selecionados pelo projetista, sendo necessário recorrer à ajuda

de alpinistas para que os técnicos do LABEST pudessem realizar a instalação. A aplicação dos extensómetros foi efetuada de forma cuidadosa no que se refere à preparação da superfície do aço, a colagem e a proteção dos sensores, tendo em vista o seu bom desempenho e durabilidade. Pese embora as condições ambientais agressivas do local, foi obtida uma instalação robusta que funcionou muito bem durante todo o processo de reabilitação. (Fig. 30, 31)

Na medição dos deslocamentos verticais foi utilizado um procedimento próprio, baseado no sistema de nivelamento hidrostático, que consiste na aplicação do princípio dos vasos comunicantes a um circuito hidráulico com vários pontos de saída. Um dos pontos é considerado fixo, enquanto os restantes experimentam

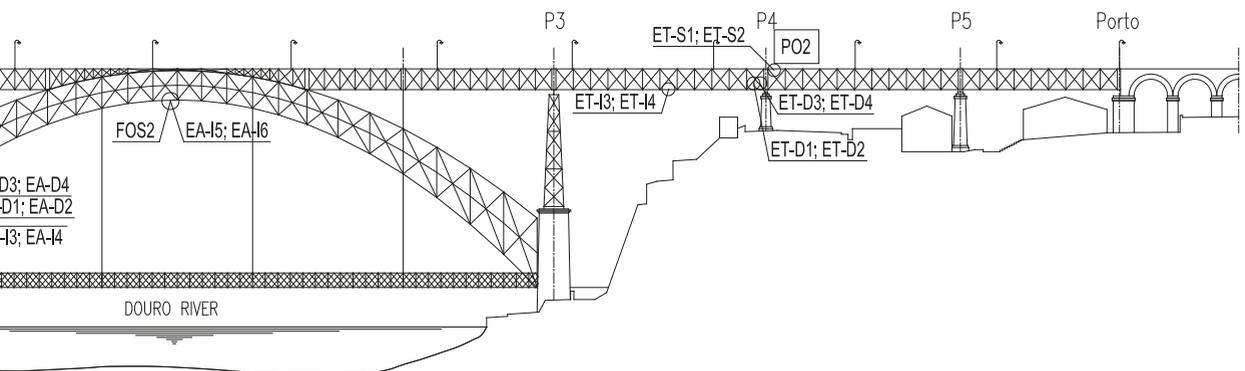
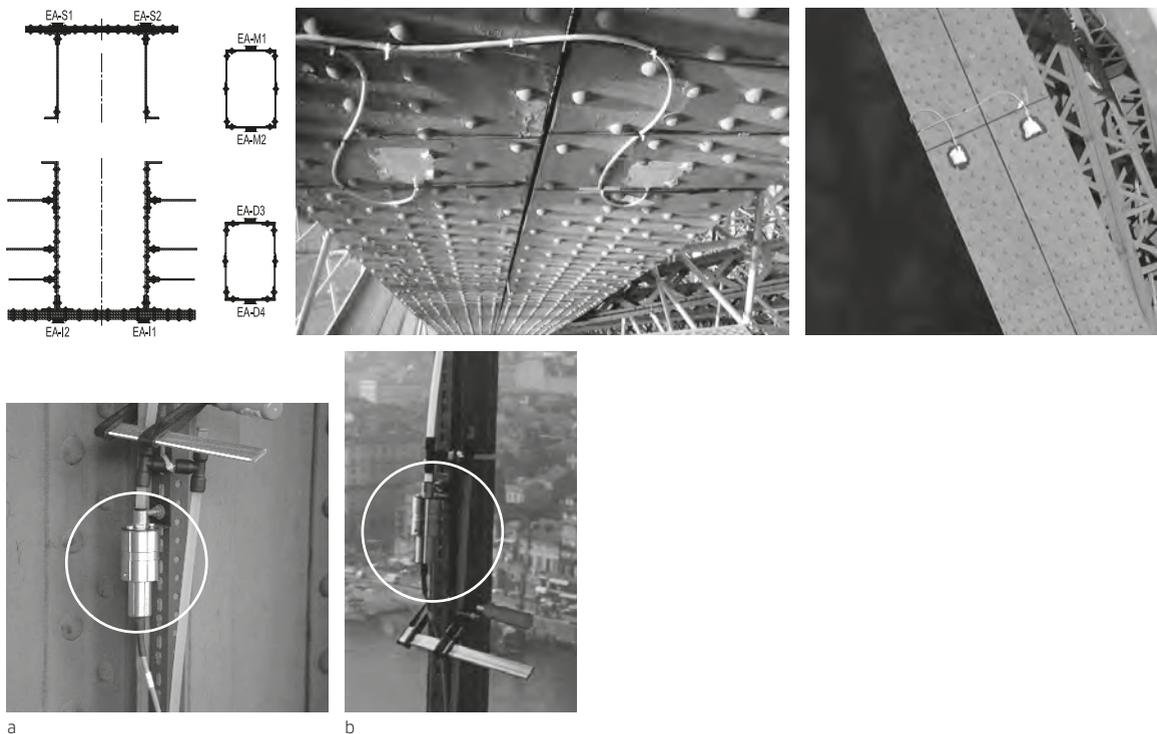


Fig. 30. Detalhes da aplicação dos extensómetros por técnicos do LABEST em secções selecionadas do arco.



deslocamentos verticais idênticos aos da estrutura. Nos pontos que se deslocam verticalmente associa-se a variação de altura de líquido a uma variação de pressão. Foram medidos deslocamentos verticais a meio vão (flechas) em quatro tramos do tabuleiro do lado de jusante, no coroamento do arco (a montante e a jusante) e sobre os pilares P2 e P4 (assentamentos de apoios). Para proceder a medições rigorosas e automáticas instalaram-se sensores de pressão em cada um destes pontos e junto de cada um dos reservatórios localizados nos encontros. (Fig. 32).

### Procedimento de ensaio

Na condução do ensaio de carga foram utilizados dez camiões de 13 toneladas cada, devidamente pesados e identificados. Foi estabelecida pelo projetista a necessidade de observar o comportamento da ponte em dez casos de carga (1-10), em correspondência com outras tantas posições de veículos imobilizados sobre o

tabuleiro. Além destes, definem-se dois percursos realizados por dois veículos que lado a lado atravessam em marcha lenta ( $v \gg 0,45$  m/s) a totalidade do tabuleiro superior, primeiro no sentido Porto/Gaia e depois no sentido inverso. O ensaio decorreu durante a noite para minimizar as perturbações no trânsito e o efeito da temperatura sobre as medições realizadas. As grandezas em observação foram lidas continuamente com 10 segundos de intervalo (Fig. 33, 34, 35).

### Resultados

O sistema de monitorização permitiu a representação gráfica, em tempo real, das deformações, deslocamentos e temperaturas medidas durante o ensaio (Fig. 36, 37).

A instalação em obra de um sistema de aquisição automático, além de permitir o acompanhamento do ensaio de carga conforme descrito, viabilizou a observação do comportamento estrutural da ponte durante um período consecutivo de 5 dias. De acordo com as

Fig. 31. Detalhes da aplicação de extensómetros no arco. Esquerda: Localização dos extensómetros na secção; Centro: Extensómetros aplicados na corda inferior do arco, EA-13/14; Direita: Extensómetros na corda superior do arco, EA-S1/S2.

Fig. 32. Sistema de medição de flechas instalado em obra: a) Pormenor de um sensor de pressão; b) Sensor instalado num montante do tabuleiro.

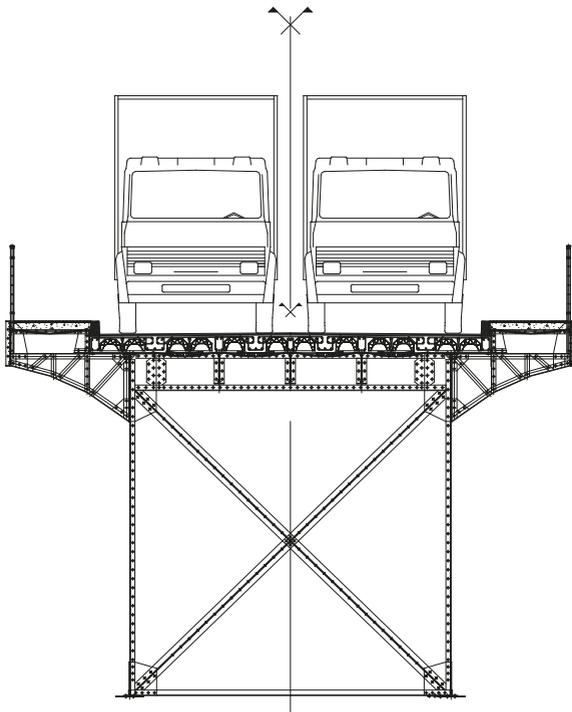
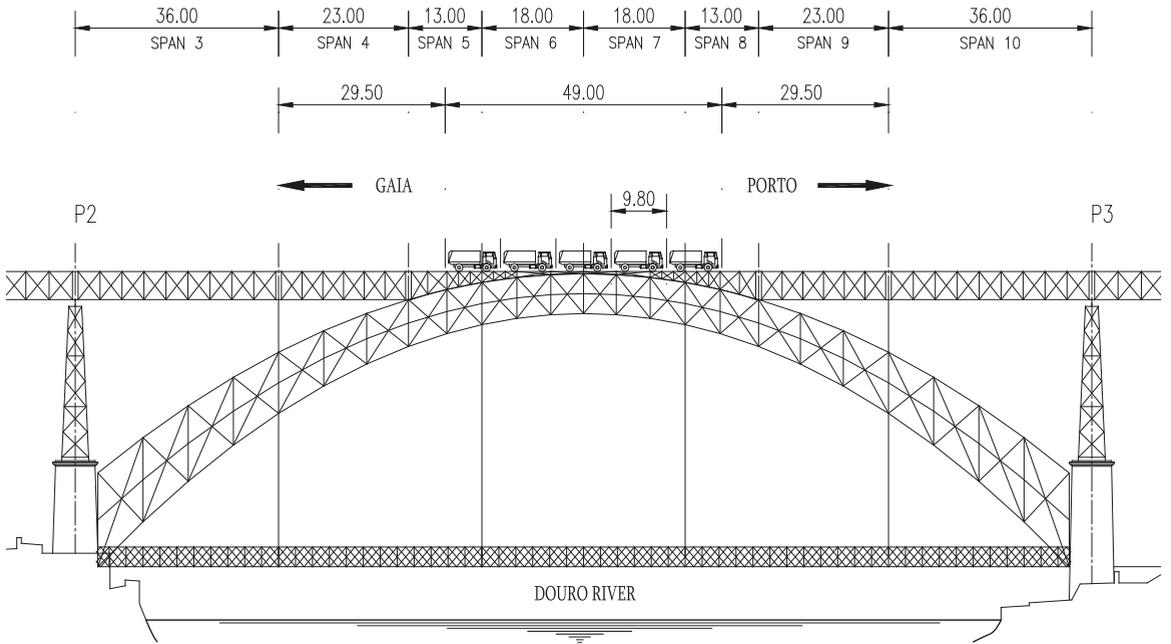
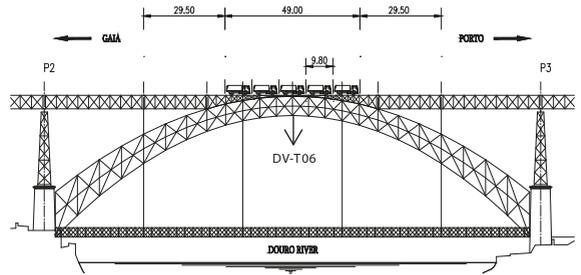
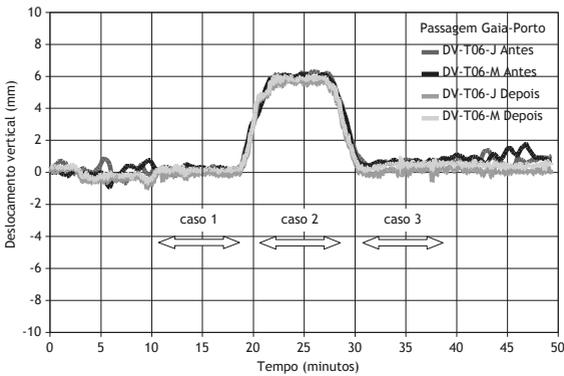
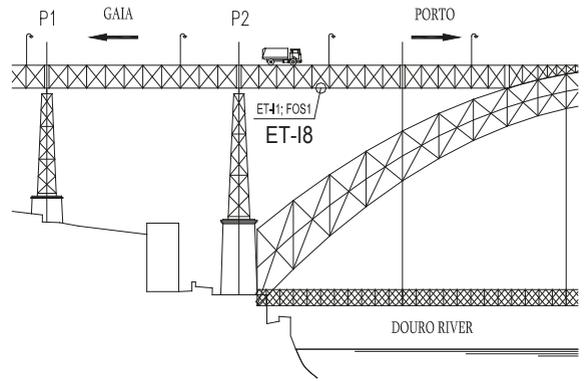
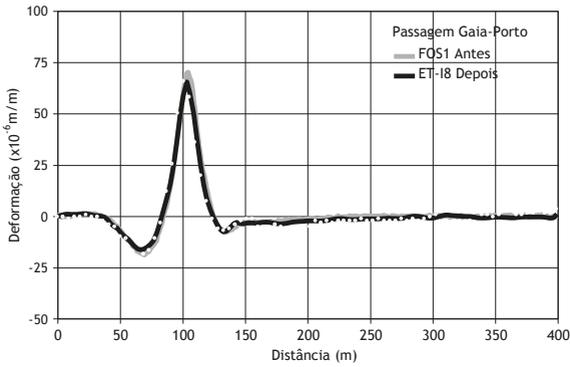


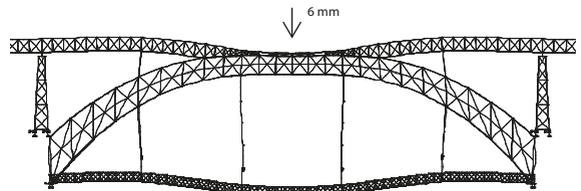
Fig. 33. Posição esquemática dos veículos no coroamento do arco.

Fig. 34. Par de camiões efetuando a travessia da ponte.

Fig. 35. Realização do ensaio de carga durante a noite.



Caso de carga 2.



Malha deformada para o caso de carga 2.

medições efetuadas a variação de temperatura tem um efeito considerável, tanto nas deformações das barras da estrutura como nos deslocamentos verticais dos pontos instrumentados (Fig. 38).

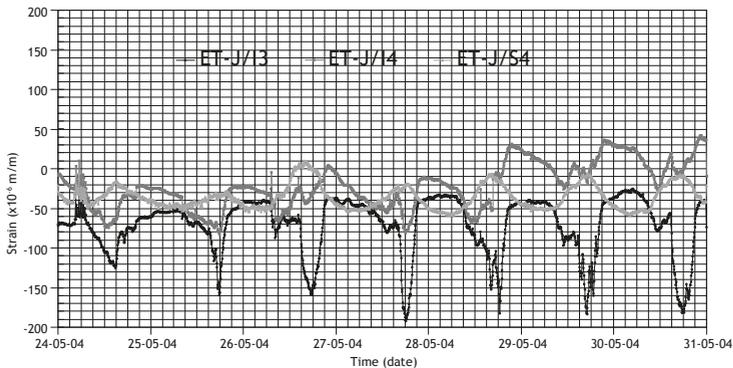
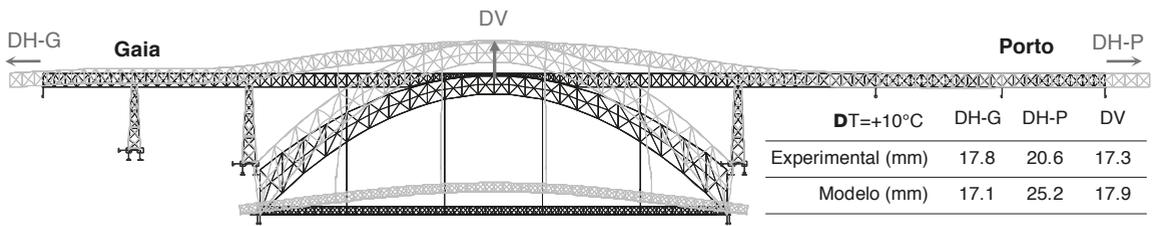
### Monitorização durante a reabilitação

Durante a reabilitação do tabuleiro foi efetuada uma alteração profunda da plataforma superior, tendo sido

demolido toda a estrutura do pavimento para reconstruir uma nova, e sido empregue maquinaria pesada para auxiliar os trabalhos. Impunha-se controlar as deformações e esforços em barras selecionadas para conhecer os efeitos estruturais dos trabalhos em curso e proceder a alterações caso necessário. O sistema de monitorização temporário serviu para registar de modo contínuo o valor das grandezas em observação, sendo emitidos relatórios

Fig. 36. Linha de influência da passagem de um par de veículos para a deformação do extensómetro ET-18, antes e depois da reabilitação.

Fig. 37. Comparação da flecha no coroamento do arco durante o ensaio de carga antes e depois da reabilitação.



semanais para os agentes envolvidos na construção (Fig. 39, 40).

#### 4. Sistema de Monitorização Permanente

##### Implementação em obra

A Ponte Luiz I foi dotada, em 2005, de um sistema pioneiro de monitorização para permitir o acompanhamento em permanência da resposta da estrutura durante a sua vida nas novas condições de utilização. O sistema de monitorização é constituído na sua essência pelos seguintes elementos: (i) transdutores em fibra ótica (de deformação, de deslocamento e de temperatura); (ii) interrogador de sinal ótico (MicronOptics si425-200); (iii) *switch* ótico 1 x 15 canais (LT3000); (iv) unidade de

CPU; (v) cabo ótico para transmissão dos sinais dos sensores; (vi) caixas de derivação/concentradoras de sinal; e (vii) unidade de acesso remoto.

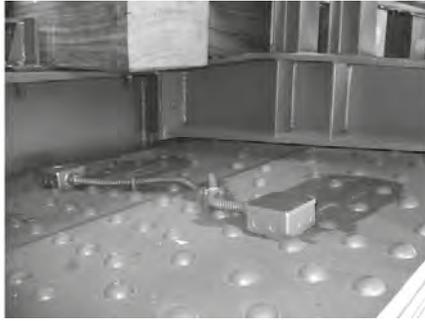
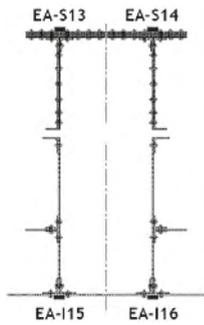
A medição de deformações na superfície metálica dos elementos da estrutura foi realizada com recurso a extensómetros de fibra ótica de rede de Bragg, devidamente preparados e protegidos em laboratório. Os extensómetros em fibra ótica de rede de Bragg caracterizam-se por apresentar imunidade a interferências eletro-magnética, possibilidade de multiplexagem e uma elevada sensibilidade às deformações e às variações de temperatura.

O sistema de monitorização contempla a instrumentação das seguintes secções com extensómetros: (i) 30 secções em barras do tabuleiro superior; (ii) 14 secções em peças do arco; (iii) 9 secções em barras dos

Fig. 38. Deformada do modelo da ponte para uma variação uniforme de temperatura de 10° C. Comparação dos valores experimentais dos deslocamentos horizontais dos encontros Gaia (DH-G) e Porto (DH-P) e do deslocamento vertical do coroamento do arco (DV) com os valores do modelo

Fig. 39. Ilustração dos gráficos dos relatórios semanais durante a execução das obras.

Fig. 40.



montantes de suspensão; (iv) 6 secções em elementos dos pilares metálicos (Fig. 41).

O sistema de monitorização permanente inclui ainda um conjunto de transdutores óticos que possibilitam o acompanhamento regular do movimento de aparelhos de apoio, e juntas de dilatação. O sistema contempla seis transdutores de deslocamento horizontal nos encontros do tabuleiro superior e dois em aparelhos de apoio sobre o pilar P5. Dos três transdutores montados em cada uma das extremidades do tabuleiro, dois estão posicionados junto aos aparelhos de apoio de cada uma das vigas-treliça e o terceiro a uma cota próxima das cordas superiores de montante, de forma a aferir não só os deslocamentos longitudinais mas também eventuais rotações. Estes deslocamentos são medidos tomando como referência fixa

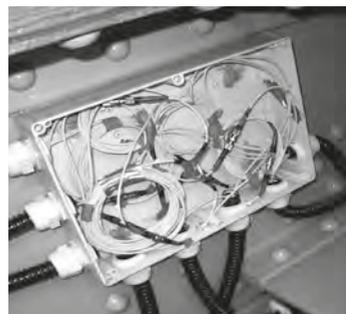
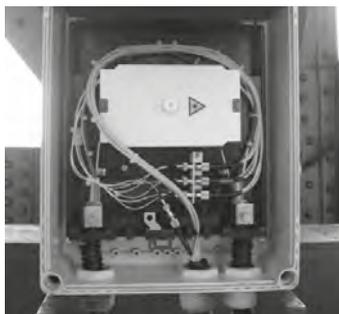
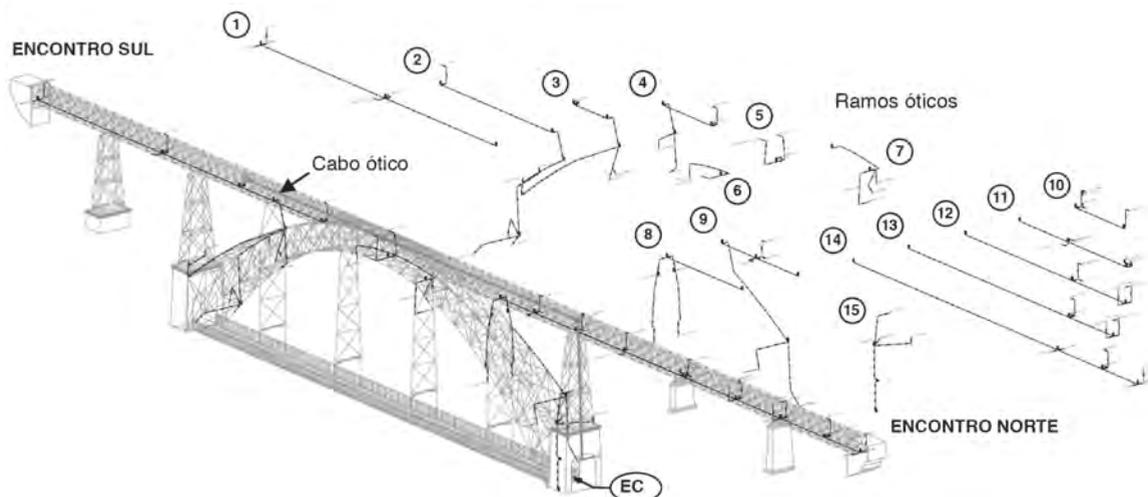
a alvenaria do coroamento dos pilares e dos encontros onde repousam os apoios, e admitindo como alvo móvel elementos da estrutura metálica (Fig. 42).

Para apoiar a interpretação das deformações e dos deslocamentos medidos pelos respetivos transdutores, foram distribuídos na obra sensores de temperatura que permitem a caracterização da temperatura ambiente e no aço, em diversos locais e sob diferentes condições de exposição.

A rede de sensores em fibra ótica apresenta uma configuração do tipo arbóreo, com um cabo ótico que deriva em 14 fibras óticas, designadas de ramos óticos, contendo cada uma delas um número máximo de 12 sensores ligados em série. O cabo ótico constitui a espinha dorsal de todo o sistema de monitorização, tendo

Fig. 41. Detalhes dos sensores de deformação aplicados às cordas do arco. Esquerda: Localização na secção; Centro: Sensores de deformação EA-S13/S14; Direita: Sensores de deformação EA-I15/I16.

Fig. 42. Transdutores de deslocamentos óticos para medir os movimentos de juntas e de aparelhos de apoio. Esquerda: Transdutor instalado num encontro antes da aplicação da proteção; Direita: Com a aplicação da proteção.



sido instalado no interior da caleira técnica metálica localizada próxima do passadiço que atravessa todo o tabuleiro superior. O percurso realizado pelo cabo no tabuleiro tem início junto ao apoio M1 e termina no pilar metálico P3. No centro deste pilar existe um tubo metálico vertical pertencente ao antigo sistema de drenagem das águas pluviais da ponte, que alberga a descida do cabo óptico até à Estação Central de Observação (ECO), situada na base de montante do pórtico de alvenaria onde se apoia o pilar, e que constitui a portada norte do tabuleiro inferior. A ligação dos 14 ramos ao cabo óptico é feita através de caixas de derivação óticas, instaladas no passadiço técnico junto aos pilares M1 (caixa sul), P3 (caixa norte) e no coroamento do arco (caixa central). O ramo óptico (RO) n.º 15, albergando as secções

transversais instrumentadas no pilar P3 (na base do qual se situa a ECO), encontra-se ligado diretamente ao switch óptico do sistema de aquisição (Fig. 43, 44).

O sistema de aquisição de dados para a monitorização permanente do comportamento da ponte é constituído por um interrogador laser de varrimento si425-200 da Micron Optics, um *switch* óptico (comutador) 1 x 15 para fibras, modelo LT3000, um computador e um router. O equipamento permite frequências máximas de aquisição de 50 Hz quando uma única fibra é interrogada, e de 2 Hz por canal quando são lidos todos os 15 canais disponibilizados pela desmultiplicação operada no *switch* óptico (Fig. 45).

Fig. 43. Esquematização e desenvolvimento dos 15 ramos de fibra óptica.

Fig. 44. Rede de fibra óptica. Esquerda: Caixa de junção na base do pilar M1; Centro: Caixa de derivação óptica com as ligações entre o cabo óptico e os ramos; Direita: Caixa de concentração do sinal.



### **Análise e gestão dos resultados – SHMmensus**

A plataforma denominada por **SHMmensus**, constitui uma aplicação *web* que, de forma abrangente, procura integrar, num acesso centralizado, um conjunto de resultados relativos à monitorização estrutural e de durabilidade de obras de Engenharia Civil, englobando o caso específico do **Sistema de Monitorização da Ponte Luiz I**. O acesso geral ao **SHMmensus** faz-se, através de qualquer computador com ligação à internet, pelo endereço: [shm.newmensus.pt](http://shm.newmensus.pt). Os privilégios de acesso à obra e aos respetivos resultados são controlados mediante credenciais definidas pelo gestor do sistema. O utilizador tem agora acesso à plataforma de consulta da informação específica dessa obra. Distinguem-se várias vistas que congregam toda a informação relevante de forma estruturada e hierárquica de modo a potenciar uma rápida e fácil consulta.

Na estrutura interna identificam-se as várias áreas de atuação. O primeiro nível da hierarquia, nível 1, reside na barra menu superior. Este menu é fixo, qualquer que seja a vista, facultando a alternância entre a **Obra**, o **Projeto** e os **Resultados**. O segundo nível, nível 2, ocupa a barra menu lateral. O seu conteúdo depende da opção previamente selecionada no menu superior. Será este menu que vai definir o conteúdo da região central, onde será disponibilizada a informação final. Todo o conteúdo, seja ele a apresentação dos detalhes do projeto, seja a consulta interativa dos resultados da

obra, aparecerá exclusivamente na área de conteúdos desta vista. (Fig. 46)

O menu superior **Resultados** abrirá, por sua vez, o acesso a todo o conjunto de resultados da monitorização. Este campo desdobra-se num conjunto de conteúdos dinâmicos, atualizados diariamente de forma programada, que facultam o acesso, de forma expedita, a todos os resultados da monitorização em curso.

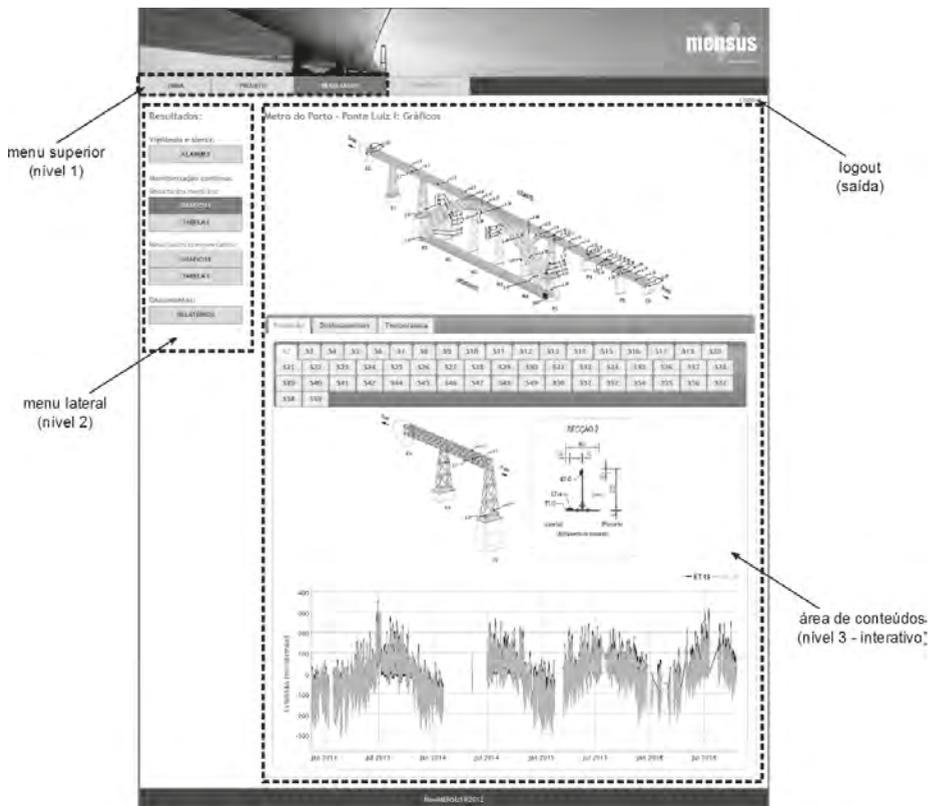
O conteúdo do separador **Alarmes** pretende fazer um resumo do estado da obra fornecendo indicadores resumidos sobre o estado da mesma. Comparam-se os diferentes resultados com limites de alerta amarelo e vermelho definindo-se, em conformidade, um estado associado a um símbolo elucidativo:  - OK;  - Estado de alerta amarelo;  - Estado de alerta vermelho. No caso de um sensor deixar de ter resultados válidos, por exemplo devido a avaria ou estando fora do campo de medida, o respetivo estado aparecerá identificado com o símbolo .

No campo **Resultados medidos** associado à **Monitorização contínua** apresentam-se gráficos e tabelas representativos de todas as grandezas medidas na estrutura. Contempla-se assim o acesso à evolução no tempo dos deslocamentos do tabuleiro, das extensões na estrutura e das temperaturas envolventes.

Na vista **Gráficos** facultam-se o acesso gráfico a todos os resultados da monitorização contínua. Na área de conteúdos aparece assim um painel interativo que permite a seleção da grandeza a visualizar (deslocamento, extensão ou temperatura) e a seleção da secção da estrutura a consultar. O gráfico interno mostrará, de forma interativa, a seleção efetuada, representando todos os sensores envolvidos na secção em causa. Podem-se distinguir as séries temporais representadas no mesmo gráfico pelas suas cores. O esquema interno que acompanha o gráfico indica o posicionamento do sensor na estrutura, bem como a convenção de sinais, quando relevante.

De forma análoga à apresentada para as grandezas medidas na monitorização contínua, o campo que se designa por **Resultados compensados**, permite a consulta das séries temporais com os resíduos associados à aplicação do modelo de regressão múltipla que visa compensar as variações ambientais e seus efeitos previsíveis na estrutura. Considera-se que o resultado assim obtido representa uma base para a deteção de eventuais

Fig. 45. Armário localizado no Encontro do Porto lado montante que aloja a Estação Central de Observação (ECO). Contém todo o equipamento de aquisição, armazenamento de dados e comunicação remota existente na obra.



alterações da condição estrutural.

O resultado da aplicação do modelo de compensação dos efeitos ambientais pode ser observado no movimento da junta de dilatação do encontro de Gaia para os últimos 3 anos de registos. A grande variabilidade diária e sazonal deste deslocamento (Resultados medidos) é reduzida de forma muito significativa quando se retira o efeito da temperatura sobre a estrutura (Resultados compensados). Os limites de alerta amarelo e vermelho que sinalizam alterações na estrutura, menos ou mais significativas, podem ser estabelecidos de forma muito mais eficaz sobre os resultados compensados (Fig. 47).

### Identificação de efeitos operacionais

O Sistema de Monitorização permanente instalado na Ponte Luiz I permite, por um lado, uma vigilância

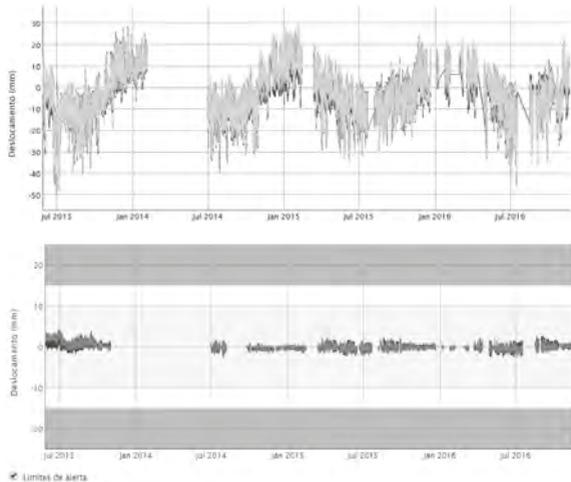


Fig. 46. Estrutura interna da Aplicação Web e respetivos níveis hierárquicos.

Fig. 47 Movimento de apoios do encontro lado Gaia. Resultados não compensados (cima); Resultados compensados (baixo).



medições intervaladas de um período de tempo mais ou menos alargado (5 minutos, 3 horas), já que a variação destes efeitos processa-se de forma lenta. Estes são o tipo de resultados descritos no ponto anterior.

Por outro lado, o Sistema de Monitorização instalado permite a identificação dos efeitos operacionais, como é o caso da circulação das composições do Metro no tabuleiro superior. Para detetar os efeitos estruturais da passagem de composições que atravessam a ponte, o sistema tem, no entanto, de efetuar as leituras em modo dinâmico, seja de 50 leituras por segundo (50Hz). Em modo dinâmico, o sistema permite registar a resposta das grandezas monitorizadas durante a passagem das composições do metro a uma determinada velocidade. Colecionando e analisando as respostas, designadas por **linhas de influência**, para sucessivas passagens é possível caracterizar o tráfego e identificar alterações no comportamento da estrutura (Fig. 48).

continua do comportamento da obra de arte através da medição de grandezas estruturais que variam em função do estado da obra e das condições ambientais, com relevo especial para as variações de temperatura. Este controlo dos efeitos ambientais é efetuado com

A caracterização do tráfego, nomeadamente a identificação da velocidade e do valor das cargas circulantes, permite um controlo e uma gestão mais eficazes das infraestruturas por parte das entidades gestoras (Fig. 49-51).

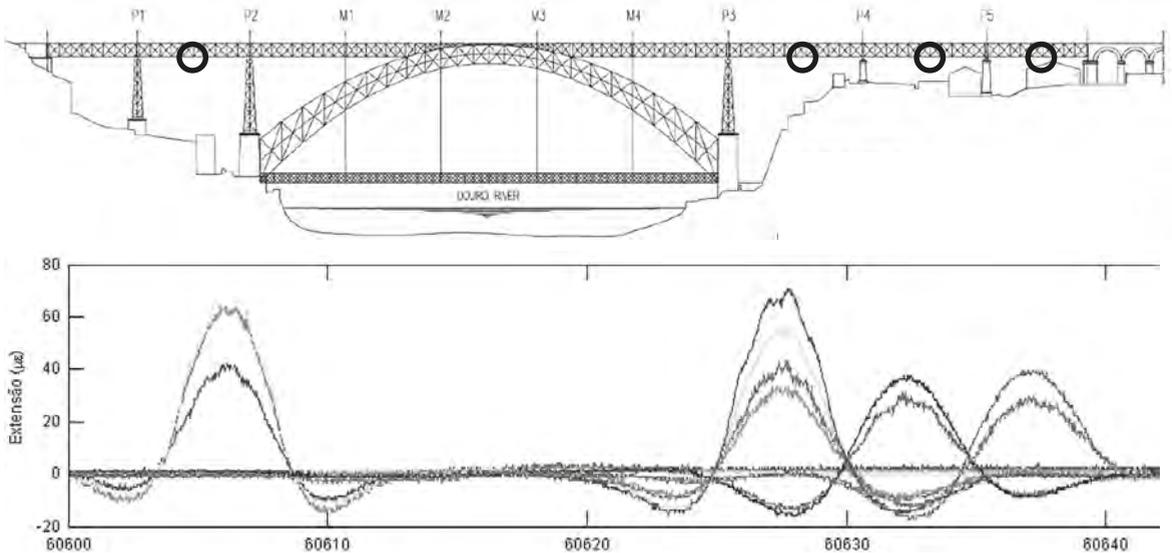
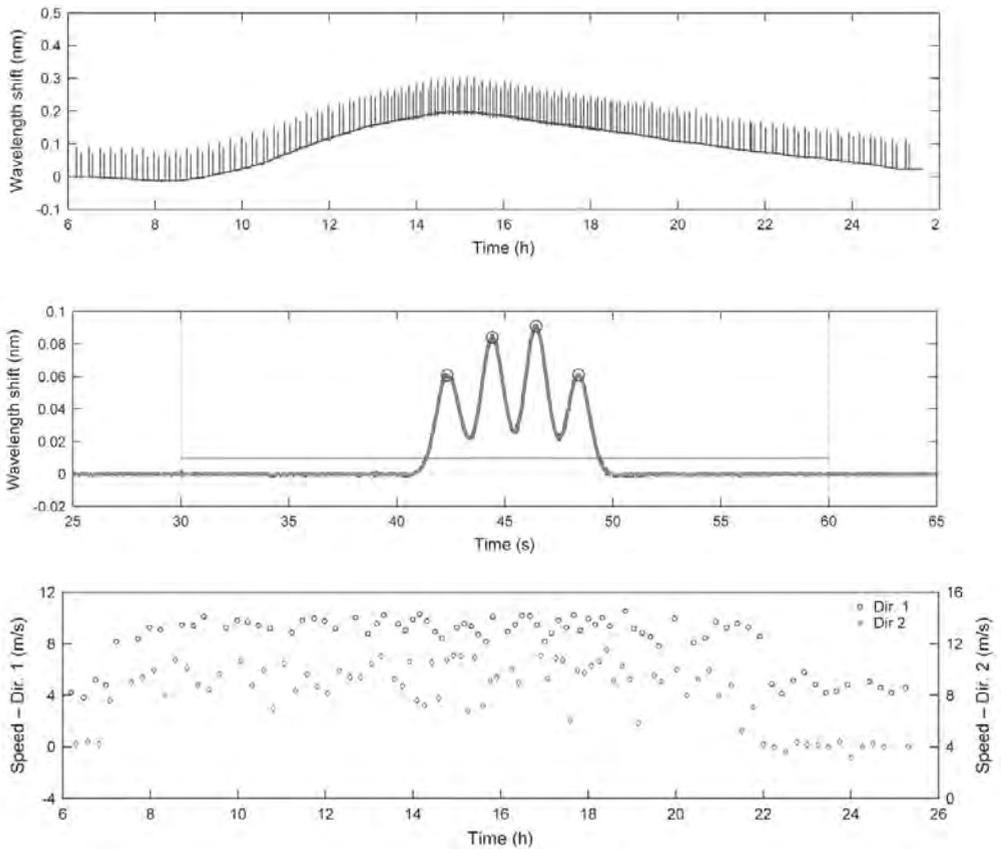


Fig. 48. Ilustração das linhas de influência das deformações registadas nos sensores assinalados nas cordas do tabuleiro superior, durante a passagem de composições de um só veículo.



## 5. Monitorização de Eventos

A Ponte Luiz I tem exibido um comportamento dinâmico menos robusto quando é solicitada por um conjunto elevado de pessoas atravessando o tabuleiro, quer o superior quer o inferior, em marcha ou em corrida de forma cadenciada. O problema reside em que apresenta modos de vibração transversais com frequências próprias que podem ser excitados com o caminhar de um grupo significativo de pessoas, e apresenta igualmente modos de vibração verticais que poderão ser excitados com um grupo de pessoas em corrida. A excitação aumenta a amplitude da aceleração diminuindo a comodidade das pessoas que atravessam a ponte e causando insegurança. Durante a realização de alguns eventos

foram colocados temporariamente acelerómetros para medir as acelerações e avaliar o nível de conforto das pessoas que circulam.

### Meia Maratona do Porto

Durante a Meia Maratona realizada em setembro de 2015 foram colocados sismógrafos no passeio jusante do tabuleiro inferior, a um quarto e a meio do vão total, com o objetivo de registar as acelerações provocadas. Neste tipo de evento, em que as pessoas circulam em corrida, os primeiros modos de vibração vertical do tabuleiro podem ser excitados como aconteceu em certos períodos do evento. Com esta excitação o tabuleiro vibra de forma sensível na direção vertical (Fig. 52, 53).

Fig. 49. Variação de sinal no sensor S26-B (carlinga) durante um dia de observação.

Fig. 50. Variação de sinal no sensor S26-B (carlinga) durante um período de 40 segundos no qual se identifica a passagem de uma composição de um veículo, sendo notório os picos correspondentes à passagem dos boggies.

Fig. 51. Estimativa da velocidade de circulação dos veículos identificados ao longo de um dia de observação.

## S. João, 2016

Para registo das acelerações no tabuleiro superior e coroamento do arco durante a noite de S. João de 2016, foram instalados acelerómetros para medir as acelerações transversais e verticais. Os sensores foram instalados durante a tarde do dia 23 de junho utilizando o passadiço técnico para aceder à secção da corda inferior do coroamento do arco. O sistema de aquisição ficou alojado na parte interior do passadiço técnico junto aos sensores. A leitura dos dados de três acelerómetros foi iniciada às 17:30 do dia 23 e o sistema permaneceu em funcionamento ininterrupto até às 12:30 do dia 24

de junho. Os dados foram gravados a 40 Hz. Os dados recolhidos permitem caracterizar os efeitos globais da vibração (Fig. 54) lateral do arco/tabuleiro e também da vibração vertical. A aquisição de dados compreendeu períodos de vibração ambiental, vibração operacional (passagem do metro), e vibrações causadas pela passagem de pessoas durante o São João.

### Vibração horizontal

Após o Fogo de Artifício, com a passagem das pessoas em passo normal, foram registados três períodos de amplificação da vibração horizontal: um período

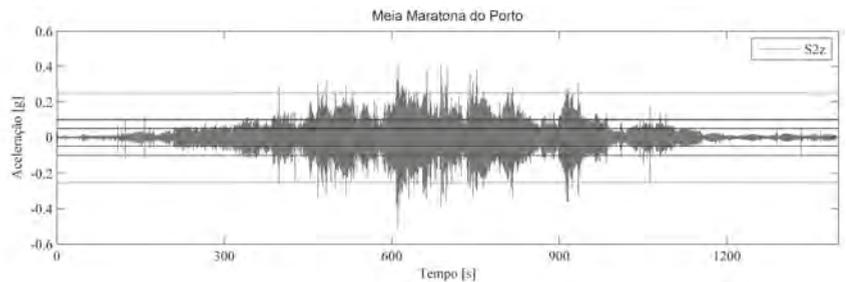


Fig. 52. Corredores a circular no tabuleiro inferior no sentido Porto - Gaia durante a Meia Maratona realizada em 20 de setembro de 2015.

Fig. 53. Registos de aceleração na direção Z (vertical) medida pelo sísmógrafo localizado na parte central do tabuleiro inferior, na corrida da Meia Maratona, no sentido Porto-Gaia. Verifica-se que a espaços se ultrapassa a linha vermelha do gráfico entrando-se num nível de conforto considerado inaceitável.

Fig. 54. Esquerda: localização dos acelerómetros na medição de vibrações durante o S. João de 2016. Direita: local de instalação dos sensores junto à corda inferior do coroamento do arco, com posto de observação no passadiço técnico.



inicial compreendido entre as 00:40 e as 00:55, um longo período das 01:10 até às 01:52 e um período final compreendido entre as 02:00 e as 02:11;

- Nestes períodos a aceleração vertical manteve-se baixa e dentro dos limites de conforto máximo (Fig. 55);
- Face à solicitação induzida pelo conjunto elevado de pessoas que cruzou a Ponte verificou-se a amplificação da vibração lateral do tabuleiro superior segundo o primeiro modo vibração lateral com a frequência de 0.963 Hz (Fig. 56, 57).

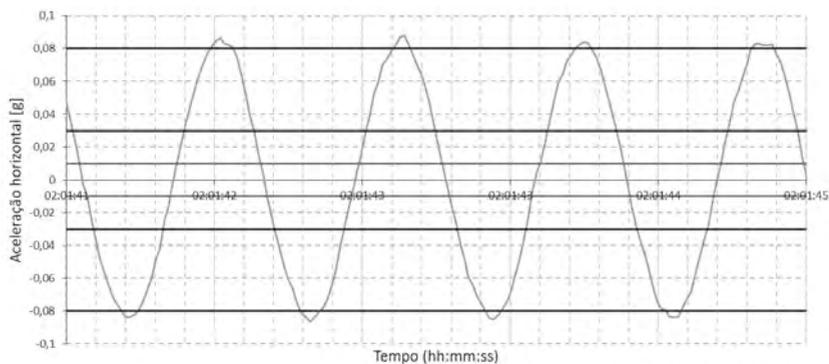
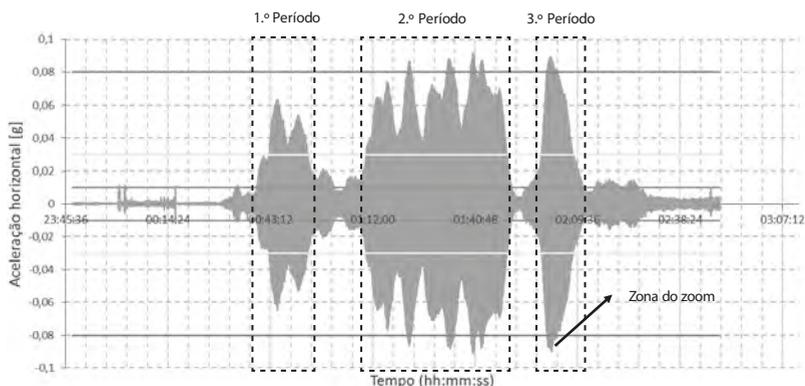


Fig. 55. Concentração de pessoas do lado de Gaia, à espera da permissão de circular no tabuleiro superior, após o Fogo de S. João.

Fig. 56. Vibração horizontal (lateral) registada no coroamento do arco durante o S. João de 2016. Existem períodos alargados em que o nível mínimo de conforto é atingido (linha branca), e períodos curtos com vibrações inaceitáveis causando insegurança (excede a linha cinza).

Fig. 57. Zoom das acelerações registadas num dos instantes de amplitude máxima (3º período). A onda harmónica apresentada tem um período de  $1/0.963=1.0384$  s, que é característico do modo lateral global da ponte.



### **Agradecimentos**

Agradece-se a colaboração essencial da Metro do Porto, Transmetro, Soares da Costa, Grid, FiberSensing, NewMENSUS, e LABEST, que com o seu apoio permitiram a realização deste projeto.

Agradece-se ainda a participação dos colaboradores do LABEST, Carlos Félix, Bruno Costa, Américo Dimande, Filipe Cavadas; e Carlos Rodrigues, Helena Figueiras e José Carvalho da NewMENSUS, que com a sua dedicação e trabalho realizaram este projeto.



