

Monitorização da nova Travessia Ferroviária do Sado durante o lançamento incremental do tabuleiro

João Pedro Santos, Xu Min, Luís Oliveira Santos
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

RESUMO: A nova travessia ferroviária do rio Sado integrada na Variante de Alcácer é uma estrutura mista de aço e betão com sistema estrutural do tipo “bowstring” e cuja construção incluiu um conjunto de processos exigentes. Nestas condições foi implementado um sistema de monitorização do comportamento estrutural, concebido para operar tanto durante a construção como em serviço. A presente comunicação tem como principais objectivos apresentar o referido sistema de monitorização, no que diz respeito às camadas de *hardware* e *software*, e mostrar a sua utilidade no controlo da segurança estrutural, em tempo real, através de uma visualização de dados contínua e *on-line* do lançamento incremental do tabuleiro da ponte. Apresentam-se, também, alguns valores das grandezas estruturais obtidas durante este processo construtivo e a sua validação através da comparação com resultados obtidos com um modelo numérico.

1 INTRODUÇÃO

A ponte ferroviária sobre o rio Sado, incluída na Variante de Alcácer e recentemente inaugurada, teve de satisfazer exigentes requisitos ambientais que condicionaram fortemente a sua localização, concepção e construção (Reis & Lopes, 2009).

A obra de arte possui uma extensão total de 2,7 km, incluindo os viadutos de acesso em ambas as margens e a ponte, constituída por três tramos com 160 m de vão.

O sistema estrutural da ponte é do tipo “bowstring”, com arcos metálicos de secção hexagonal oca e dimensões que variam entre 1,49 m × 2,40 m, nas nascenças, e 3,20 m × 1,80 m, no fecho. O tabuleiro, com secção trapezoidal mista de aço e betão e uma largura de 15,85 m no tabuleiro, é suspenso axialmente, em cada tramo, por um único plano de 18 pendurais com secção circular de 200 mm de diâmetro.

Os pilares da ponte são formados por um fuste tubular em betão armado, com envolvente inscrita num rectângulo de comprimento 8,50 m e largura variável entre 4,70 m e 5,20 m, e encontram-se fundados sobre estacas com 2,0 m de diâmetro.

Os viadutos desenvolvem-se em tramos de 45 m e são constituídos por secção mista bi-viga de aço e betão com vigas de alma cheia nas quais assenta uma laje de betão. A conexão de corte longitudinal é realizada, em toda a estrutura, por intermédio de conectores do tipo “perno-de-cabeça”.



Figura 1. Vista geral da ponte sobre o rio Sado.

A dimensão da obra de arte, a solução estrutural escolhida e os referidos condicionamentos ambientais, tornaram necessária a adopção de processos construtivos complexos e exigentes do ponto de vista do rigor no controlo de qualidade e da segurança estrutural.

Nestas circunstâncias, foi concebido e implementado um plano de monitorização (Santos & Xu, 2008), que visou, por um lado, satisfazer as exigências estabelecidas para a fase construtiva (GRID, BEG, Ferbritas, 2007), e, por outro lado, permitir a monitorização do comportamento estrutural em serviço. A construção desta obra foi, assim, acompanhada por uma intensa instrumentação e consequente monitorização do seu comportamento estrutural, a que se seguiu a realização de ensaios de carga, no final da construção, estando actualmente em curso a sua observação em fase de serviço.

O presente trabalho visa divulgar a monitorização estrutural desta obra de arte, merecendo uma ênfase particular a observação realizada durante o lançamento incremental do tabuleiro. Assim, após uma breve descrição do processo construtivo utilizado, nomeadamente do lançamento incremental do tabuleiro da ponte, apresenta-se o sistema de monitorização instalado, dedicando-se particular atenção ao equipamento utilizado durante o lançamento do tabuleiro e ao *software* integrado de monitorização AMoS (***A**utomatic **M**onitoring **S**ystem*) totalmente desenvolvido no LNEC, instalado na ponte sobre o rio Sado aquando do primeiro lançamento incremental e que se encontra actualmente em execução na monitorização da estrutura em serviço. Por fim, apresentam-se os valores de parte das grandezas adquiridas durante os lançamentos incrementais dos três tramos da ponte, e a validação da segurança estrutural destas operações através da comparação destes dados com os obtidos através de um modelo numérico.

2 LANÇAMENTO INCREMENTAL DO TABULEIRO DA PONTE

O processo construtivo da ponte incluiu a execução do perfil metálico trapezoidal do tabuleiro da ponte na margem esquerda e o seu posterior lançamento incremental sobre o rio, de forma a assumir progressivamente a sua posição final. Após o lançamento do caixão metálico foram montados os arcos, estabelecida a ligação dos pendurais ao perfil metálico e betonada a laje do tabuleiro.

A execução do caixão metálico trapezoidal na margem sul foi executada sobre uma plataforma construída sobre os pilares que delimitam os quatro tramos, do viaduto de acesso sul, adjacentes à ponte. A considerável dimensão dos vãos tornou necessária a construção de dois pilares provisórios por tramo, limitando-se, assim, o comprimento máximo do perfil metálico em consola a 54 m. Foi também utilizada uma estrutura treliçada (a amarelo na Figura 2) com 20 m de extensão, que colocada na extremidade

livre do tabuleiro reduz o comprimento máximo do perfil metálico do tabuleiro em consola para 34 m.

Foram realizadas três operações de lançamento incremental do tabuleiro, correspondendo cada uma aos respectivos tramos da ponte. Cada operação de lançamento decorreu ao longo de três dias, alcançando-se um pilar provisório em cada um dos dois primeiros dias. As três operações tiveram lugar em 2009, de 30 de Março a 1 de Abril, 25 a 27 de Maio e de 20 a 22 de Julho.

Na Figura 2 apresentam-se vistas das três operações, chamando-se a atenção, na imagem superior, para a plataforma de montagem do tabuleiro. Os pilares provisórios suportaram posteriormente as torres destinadas à elevação dos arcos. Na imagem de 2009-07-20 da referida Figura 2 é visível o início da construção destas torres.



Figura 2. Lançamento incremental do tabuleiro.

Um aspecto particularmente importante na execução do lançamento do tabuleiro foi a definição do seu perfil, estabelecido segundo uma trajectória circular, pelo que os diversos aparelhos de apoios provisórios, quer se situem sobre os pilares definitivos e provisórios ou sobre a plataforma de montagem do perfil metálico, foram colocados nas cotas correspondentes a essa trajectória (Teixeira Duarte, SA, 2009), tal como ilustrado na Figura 3.

3 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

3.1 Instrumentação e Hardware

A instrumentação da ponte sobre o rio Sado decorreu durante a sua construção e reflecte, quer no que diz respeito a grandezas adquiridas quer na localização dos transdutores, a necessidade de monitorizar o comportamento estrutural tanto nessa fase como durante a vida útil da obra-de-arte.

As grandezas estruturais medidas na ponte sobre o rio Sado consistem em deslocamentos, rotações, extensões e forças nos elementos metálicos e de betão que consistem a estrutura. Os deslocamentos verticais do tabuleiro são medidos em diversas secções dos três tramos da ponte através de um sistema de nivelamento hidrostático instalado na fase final da construção e constituído por um total de 10 células de pressão relativa (apresentadas na Figura 4). São também medidos deslocamentos horizontais relativos, na junta sobre o pilar P4, recorrendo, para tal, a transdutores de deslocamentos magnetoestrutivos.

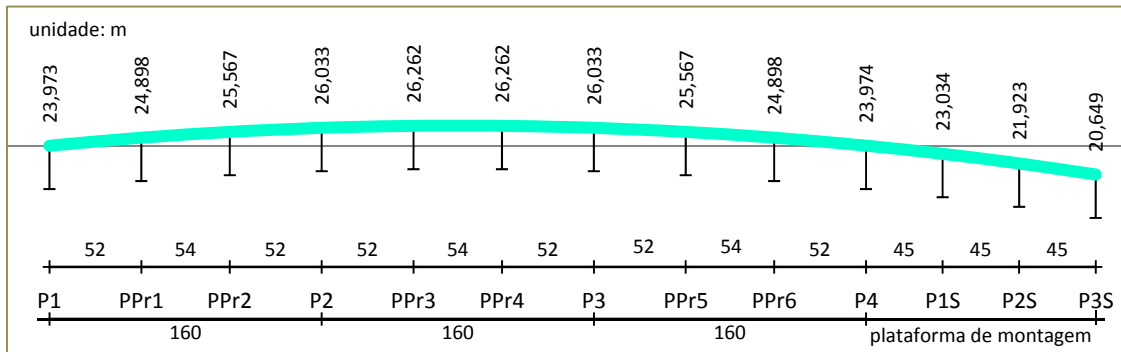


Figura 3. Cota dos apoios provisórios durante o lançamento incremental do tabuleiro.

As rotações são medidas em seis secções do tabuleiro, como pode ser observado na Figura 4, através clinómetros eléctricos biaxiais com capacidade para medir rotações em torno de dois eixos horizontais, com uma resolução de 0,2" sex.

A medição de extensões é efectuada em cinco secções do tabuleiro e em nove secções dos arcos através de extensómetros eléctricos de resistência nos perfis metálicos ao passo que no betão é feita com recurso a extensómetros acústicos de corda vibrante. Na Figura 4 podem ser observadas as 14 secções instrumentadas com extensómetros na ponte sobre o rio Sado.

A medição de forças é levada a cabo em doze dos 54 pendurais através de células de carga anelares.

Para além das grandezas estruturais foram monitorizadas grandezas e solicitações ambientais provocadas à estrutura. Na monitorização destas grandezas deve ser referida a instalação de termómetros nas superfícies dos perfis metálicos em três secções do arco (secções do arco central) e em duas do tabuleiro (sobre os pilares P2 e P3). Nestas foram também instalados termómetros eléctricos de resistência de embeber no betão. Interessa também referir a medição de grandezas ambientais como a velocidade e direcção do vento, a pluviosidade ou a humidade relativa, através de uma estação meteorológica situada no tramo central da ponte.

No que diz respeito à instrumentação da ponte, interessa ainda referir a estudo, *in situ*, do comportamento diferido do betão, com recurso a primas instrumentados, permitindo avaliar a evolução da retracção ou da fluência.

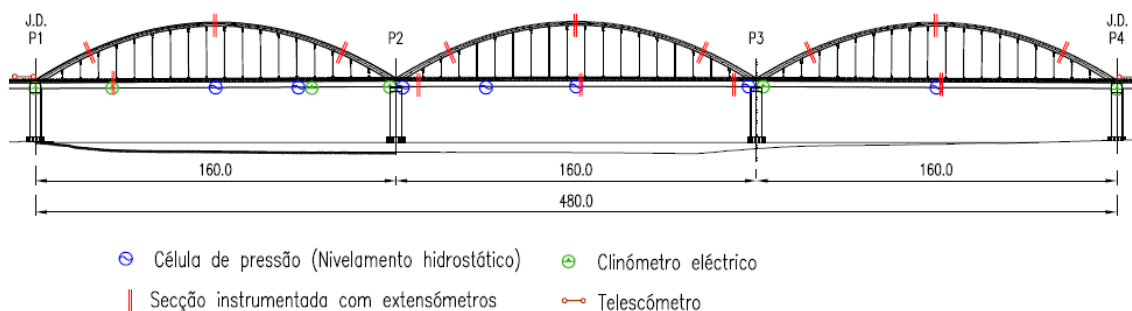


Figura 4. Representação esquemática da instrumentação na ponte.

Todas as tarefas de aquisição, transmissão e processamento de dados são, na ponte sobre o rio Sado, levadas a cabo por um processador com dois núcleos de baixo consumo energético instalado num computador com formato compacto industrial Advantech Uno-2182 colocado na ponte aquando do primeiro lançamento incremental. A aquisição de dados foi levada a cabo por unidades do tipo PAC (*programmable automation controller*), com grande capacidade de dispersão espacial. Para aquisição

de dados a taxas elevadas e para sensores cujas medições são mais susceptíveis de sofrer ruído foram usadas unidades Gantner Instruments por permitirem taxas de aquisição elevadas e levarem a cabo a conversão A/D junto ao sensor. Para os restantes sensores foram usadas unidades PAC da marca Datataker com capacidade para realizar leituras de sensores acústicos e possibilidade de instalação com grande dispersão espacial devido à utilização de multiplexadores baseados em relés e circuitos de amplificação de sinal.

A rede de aquisição de dados possui, assim, 5 unidades centrais PAC e um total de 112 unidades secundárias de aquisição constituídas por microprocessadores associados a conversores A/D e circuitos de condicionamento de sinal, garantindo assim uma dispersão espacial suficiente para realizar aquisição de dados dos 335 sensores instalados.

3.2 Gestão de dados e Software de Monitorização

O *software* que controla o sistema de monitorização da ponte do Sado foi inteiramente desenvolvido no LNEC (Santos J. S., 2009), é apelidado de AMoS (***A***utomatic ***M***onitoring ***S***ystem) e encontra-se já em funcionamento nas obras-de-arte monitorizadas pelo LNEC. Foi desenvolvido com recurso a diversas linguagens de programação, nomeadamente G (vulgarmente conhecido por LabVIEW), SQL, Hayes Command Set (AT Command) e nas linguagens reconhecidas por cada modelo de unidade de aquisição utilizado. De entre as tarefas principais realizadas por este sistema destacam-se a capacidade de adquirir dados, de forma automática e simultânea, de diferentes modelos de unidades de aquisição, de remover valores anómalos em tempo real (Santos J. S., 2009), despoletar alarmes ou eventos (Santos J. S., 2010) e obter características modais em tempo real, nomeadamente frequências próprias e modos de vibração.

Para além do AMoS encontra-se actualmente em funcionamento um sistema de gestão e preservação de dados, integralmente desenvolvido no LNEC, com capacidade para efectuar o controlo da segurança das diferentes estruturas monitorizadas assim como garantir a preservação dos respectivos dados e um acesso flexível aos mesmos através de uma ligação à internet. Este sistema inclui diversos servidores de bases de dados relacionais e de transferência de ficheiros, implementados fisicamente em locais diferentes para garantir redundância na preservação dos dados. No âmbito deste sistema, os dados são adquiridos e enviados, pelo sistema AMoS instalado em cada uma das estruturas monitorizadas, para um servidor FTP no qual são armazenados temporariamente até que um componente do sistema, denominado *Feeder*, os descarrega, converte em formato de dados relacional, e insere na base de dados. Além de garantir independência dos dados em relação a *software*, este sistema possui três grandes vantagens face às bases de dados convencionais baseadas em ficheiros:

- acessibilidade aos dados a partir de qualquer local, bastando para tal possuir uma ligação à internet;
- redundância na preservação dos dados, que se encontram armazenados em três servidores diferentes com sincronização e *backups* incrementais diários;
- formato fixo de dados permitindo a sistematização no desenvolvimento de rotinas de visualização, análise e relatório.

3.3 Monitorização durante o lançamento incremental do tabuleiro

As características técnicas e a localização da instrumentação e das unidades de aquisição do sistema de monitorização, atrás descrito, foram definidas tendo em consideração, não só a monitorização da estrutura em fase de serviço, mas também a aferição da segurança ao longo dos vários processos construtivos monitorizados.

A instalação de um maior número de clinómetros no tramo entre os pilares P1 e P2, que pode ser observada na Figura 4, não se deve a exigências durante a fase de serviço, mas antes à necessidade de controlar a segurança dos lançamentos incrementais através dos maiores valores registados para esta grandeza.

A medição das extensões no perfil metálico é levada a cabo através de sete extensómetros de resistência, instalados de acordo com o ilustrado na Figura 6. Durante o lançamento incremental assumiram especial importância os extensómetros longitudinais (1 a 4).

A medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro, essencial para o controlo do processo construtivo, foi efectuada pela empresa Teixeira Duarte.

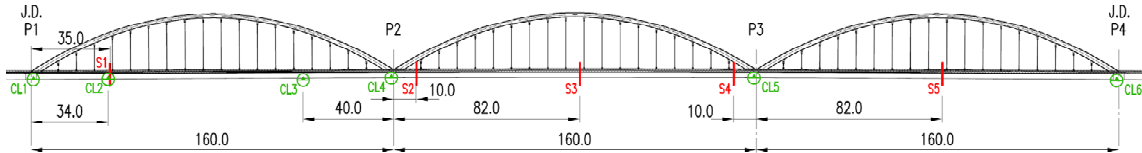


Figura 5. Localização das secções instrumentadas durante o lançamento do tabuleiro.

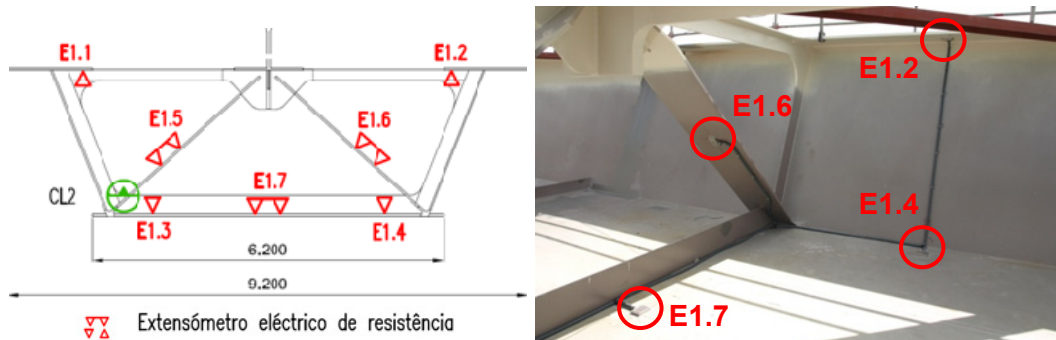


Figura 6. Secção instrumentada do tabuleiro (secção S1).

Finalmente, no que diz respeito a instrumentação, interessa referir a monitorização da evolução das reacções de apoio em dois aparelhos provisórios, colocados sobre os pilares P1 e P3, ambos situados a montante, o primeiro a Sul e o segundo a Norte. Esta tarefa foi levada a cabo através da instrumentação de cada aparelho de apoio com seis extensómetros eléctricos de resistência orientados verticalmente, três em cada face, como ilustrado na Figura 7. Após a instrumentação, e antecedendo a sua colocação em obra, estes aparelhos foram sujeitos a ensaios de calibração em laboratório.

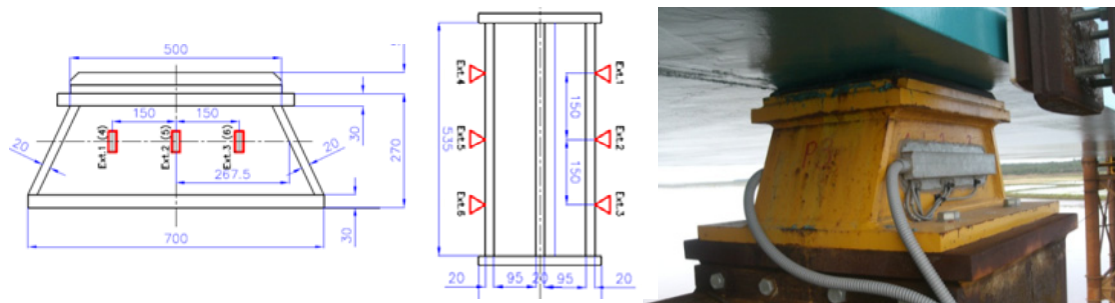


Figura 7. Aparelho de apoio provisório instrumentado (pilar P3).

Além da instrumentação, também a rede de aquisição e comunicação de dados foi definida por forma a garantir que cada transdutor fosse sempre excitado pelo mesmo circuito de condicionamento de sinal, melhorando assim a precisão da aquisição. Para

tal verificou-se ser necessário instalar unidades de aquisição com grande capacidade de dispersão espacial e baseados em protocolos de comunicação, entre os seus componentes, com grande alcance como o RS485. No tramo Norte da ponte apenas foram instaladas unidades de aquisição secundária, permitindo diferentes localizações das unidades principais, que controlam as anteriores mas que não possuem entradas analógicas de ligação aos sensores.

Por último, interessa referir o contributo importante do sistema de monitorização AMoS e do sistema integrado de gestão de dados no auxílio do controlo da segurança dos lançamentos incrementais da ponte sobre o rio Sado, que permitiram que os valores das grandezas monitorizadas fossem analisados em tempo real.

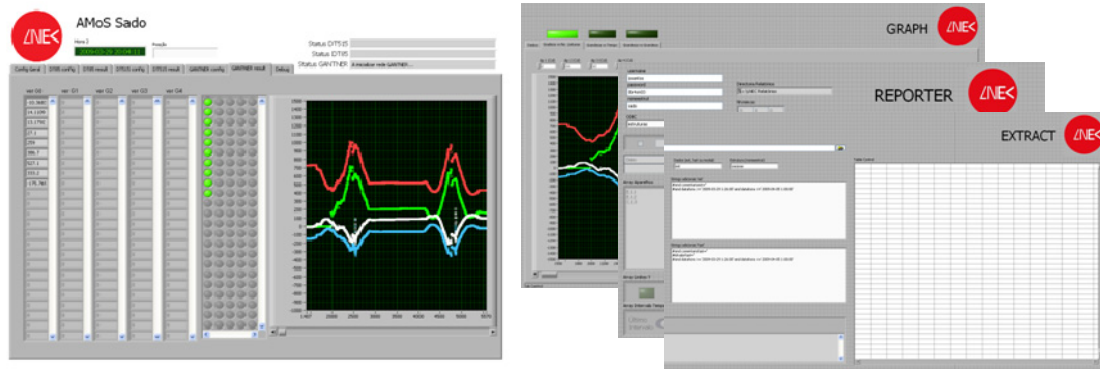


Figura 8. Sistema AMoS e ferramentas de acesso ao sistema de gestão de dados.

O armazenamento e disponibilização das grandezas adquiridas em tempo real foram, desta forma, levados a cabo não só com redundância e segurança, mas também com elevada flexibilidade e acessibilidade nas operações construtivas.

4 MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

O comportamento estrutural do perfil metálico do tabuleiro, durante os lançamentos incrementais, foi simulado através de um conjunto de modelos numéricos tridimensionais, tendo-se recorrido, para tal, ao programa SAP2000 (CSI, 2008).

A definição destes modelos foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto (GRID, BEG, Ferbritas, 2006).

Os efeitos provocados pelo processo de lançamento incremental foram simulados para cada incremento de 2 m realizado durante este processo construtivo, através de séries de modelos numéricos com uma geometria comum, variando as condições de apoio.

Na modelação numérica deste tipo de operações estruturais assumem especial importância as cotas diferenciais dos apoios (Figura 3) que garantem uma modelação concordante com a trajectória real da estrutura. Nos modelos numéricos realizados estas restrições foram tidas em conta através de deslocamentos impostos do tipo *Ground Displacement*.

Nos modelos realizados, o perfil metálico foi modelado por elementos de barra considerando apenas três secções tipo: secção de apoio, secção de transição e secção corrente. Enquanto as duas últimas são diferenciadas apenas pela espessura dos banzos, a de apoio tem uma configuração fechada de forma a coincidir com a geometria do perfil nas zonas sobre os pilares, como pode ser observado na Figura 9.

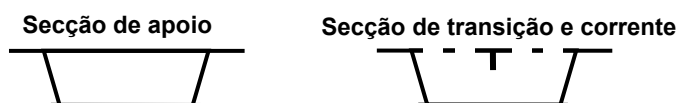


Figura 9. Secções transversais consideradas no modelo de lançamento incremental.

5 RESULTADOS OBTIDOS DURANTE O LANÇAMENTO DO TABULEIRO

5.1 Considerações gerais

Apresentam-se neste ponto os resultados estimados através dos modelos numéricos e as grandezas medidas durante cada uma das três operações de lançamento incremental.

Na apresentação destes resultados considera-se apenas a resposta da estrutura induzida por cada operação de lançamento. Tal significa que as grandezas medidas e apresentadas adiante consistem em variações em relação às medidas num instante de referência, que se considerou, para cada operação de lançamento incremental, aquele em que a secção de extremidade do tabuleiro (descontando a estrutura treliçada) se encontra sobre os aparelhos de apoio do pilar P4.

5.2 Rotações

As rotações medidas através dos clinómetros eléctricos tiveram uma evolução semelhante nos três lançamentos. Por serem claramente os valores mais expressivos, apresentam-se na Figura 10 as rotações longitudinais medidas pelos clinómetros 1 e 2 durante as três operações e os respectivos valores obtidos numericamente.

O clinómetro CL1 registou as maiores variações, sendo o valor acumulado em cada lançamento superior a 1º (cerca de 4000"sex) no instante anterior ao apoio do nariz metálico num pilar definitivo.

5.3 Extensões

Apresentam-se, na Figura 11, as extensões longitudinais medidas nos banzos superior e inferior nas secções S1 e S2, mais próximas da extremidade da consola assim como os respectivos valores obtidos através dos modelos numéricos.

Recorda-se que sendo a distância máxima entre pilares provisórios de 54 m, e existindo a estrutura treliçada com 20 m de comprimento, o troço máximo em consola do tabuleiro foi de 34 m. A secção S1, situada a 35 m da extremidade do caixão, suportou, por isso, grandes variações de momento flector. Com efeito, quando se iniciou o lançamento do tabuleiro, essa secção distava 35 m do apoio e estava sujeita a um momento flector positivo que vai diminuindo à medida que a secção se aproxima do apoio, não só pela menor distância ao apoio mas principalmente pelo efeito crescente da consola, anulando-se quando a secção se encontrava a cerca de 14 m do apoio e atingindo um máximo negativo quando a consola atinge o seu maior comprimento (ver Figura 11); no instante em que a extremidade da consola se apoia sobre o pilar seguinte dá-se uma variação brusca do momento flector nesta secção, devido ao processo levado a cabo de levantamento da extremidade da treliça, e uma clara inversão de sinal.

Nas restantes secções instrumentadas o efeito do lançamento incremental é significativamente atenuado devido à distância a que estas se situam da região do perfil em consola. As variações de extensão destas resultam da alteração de posição em tramos interiores de vigas contínuas, uma vez que ao longo do processo de lançamento do tabuleiro cada uma destas secções se localiza, progressiva e alternadamente, sobre os apoios e nos vãos. Na Figura 11 incluem-se as extensões medidas na secção S2, que ilustram claramente o exposto.

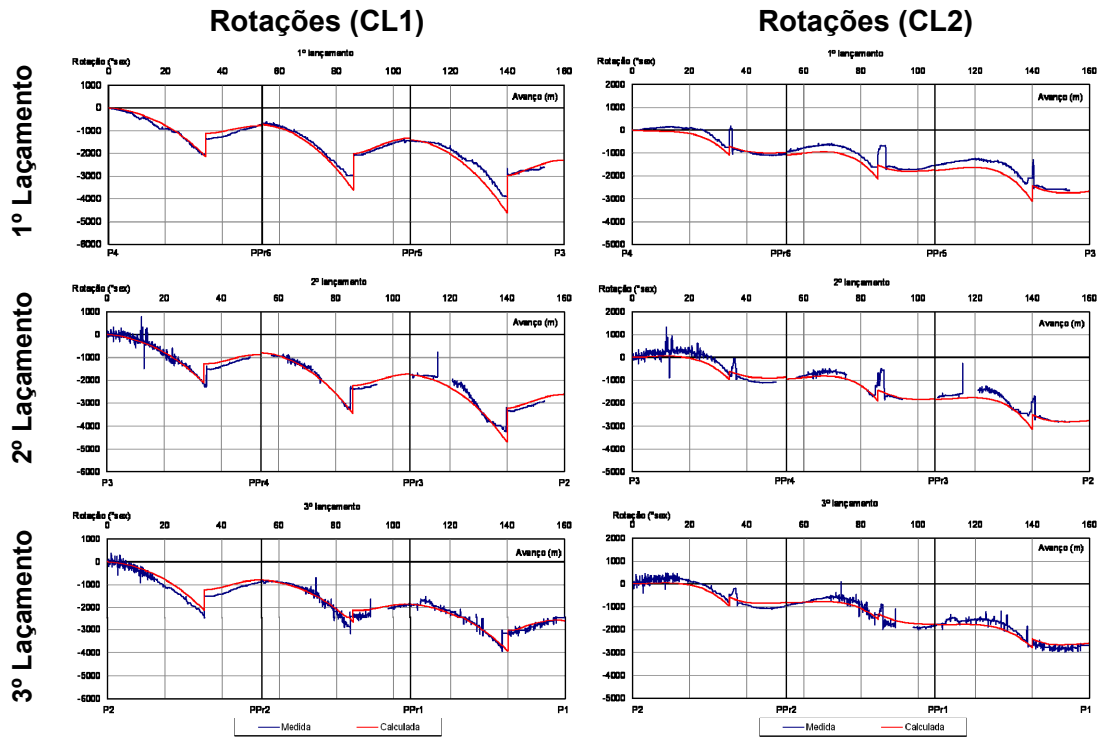


Figura 10. Rotações longitudinais nos clinómetros CL1 e CL2.

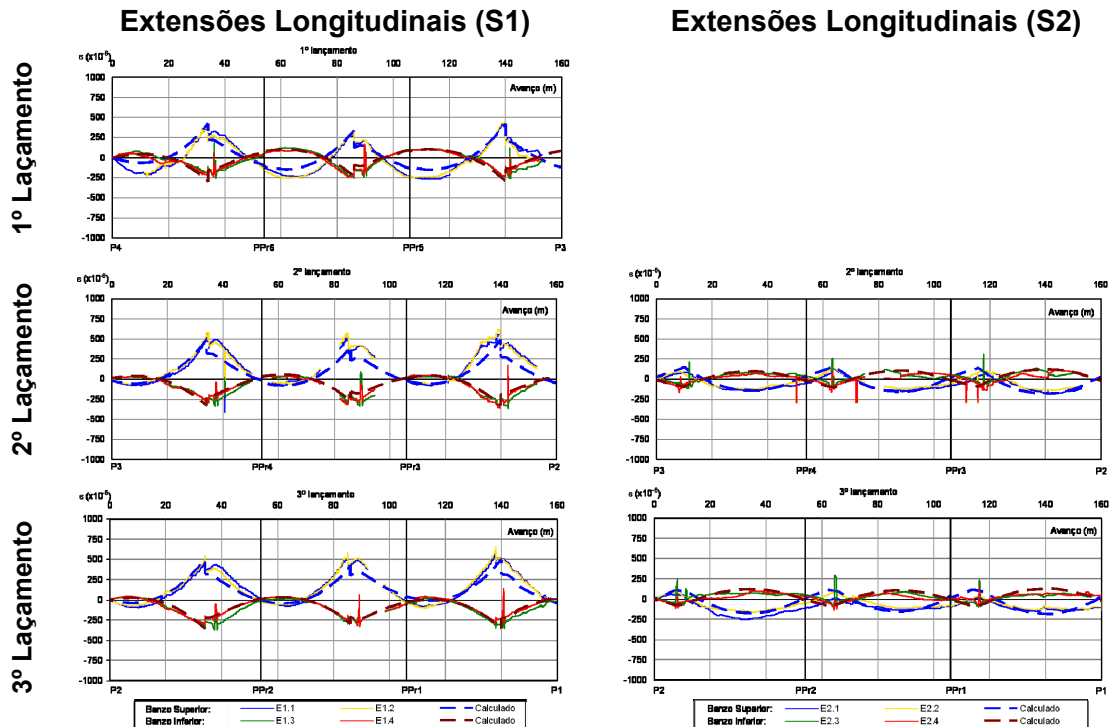


Figura 11. Extensões longitudinais nas secções S1 e S2.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nova ponte sobre o rio Sado, integrada na variante de Alcácer, foi monitorizada durante a construção pelo LNEC e continua a sê-lo em serviço.

A sua construção incluiu processos construtivos exigentes, durante os quais foi monitorizado o seu comportamento estrutural. O recurso aos sistemas de monitorização e de gestão de dados, desenvolvidos no LNEC, permitiu proceder, em tempo real, à análise dos dados adquiridos. O funcionamento de ambos os sistemas provou ser eficaz não só na preservação redundante dos dados mas também na disponibilização dos mesmos com um grau elevado de acessibilidade e segurança.

A análise dos dados adquiridos evidenciou uma elevada correlação com os resultados obtidos numericamente, validando assim a calibração do modelo numérico. Para além disso, a monitorização efectuada permitiu um reforço do controlo da segurança estrutural, bem como aferir e complementar as observações efectuadas pela Entidade Executante. O registo da resposta da estrutura durante a construção constitui um património relevante na interpretação do comportamento da obra ao longo da sua vida útil.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à REFER a possibilidade de apresentar esta comunicação. Uma palavra de reconhecimento é, também, devida aos diversos intervenientes na obra pela colaboração prestada, designadamente, o Engº Fernando Martins (REFER), o Prof. António Reis (GRID), a Teixeira Duarte, na pessoa do Engº Joaquim Tavares, e a Fiscalização da Planege/Pangest, coordenada pelo Engº Marques dos Santos.

8 REFERÊNCIAS

- CSI. (2008). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE (Rel. 12)*. Berkeley, California, USA: Computers & Structures Inc.
- GRID, BEG, Ferbritas. (2007). *Atravessamento do rio Sado. Ponte e Viadutos de Acesso. Plano de monitorização para a fase construtiva*. Lisboa.
- GRID, BEG, Ferbritas. (2006). *Linha do Sul. Variante entre a Estação do Pinheiro e o km 94. Atravessamento do Sado. Projecto de execução*. Lisboa.
- REFER. (2010). *Variante de Alcácer*. Lisboa.
- Reis, A. J., & Lopes, N. T. (2009). Variante de Alcácer do Sal. Atravessamento Ferroviário do Sado - Projecto de Obras de Arte. *VII Congresso de Construção Metálica e Mista* (pp. 1-66 - 1-76). Lisboa: CMM.
- Santos, J. S. (2010). Monitoring of Road Structures – Real time acquisition and control of data. *IRF2010 - Sharing the Road - 16th World Road Meeting* (pp. Santos, J., Silveira, P., Santos, L. O., Calado, L. Monitoring of Road Structures – Real time acquisition and control of data. IRF2010 – Sharing the Road - 16th World Road Meeting. 2010. Lisboa. (www.irf2010.com)). Lisboa: IRF - International Road Federation.
- Santos, J. S. (2009). Processamento de dados em tempo real no controlo da segurança da Ponte de São João. *ASCP09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*. ASCP - Associação para a Segurança e Conservação de Pontes.
- Santos, L. O., & Xu, M. (2008). *Plano Geral de Observação da Ponte sobre o rio Sado na Variante de Alcácer da Linha do Sul*. Nota Técnica 3/2008-NOE/DE, LNEC.
- Santos, L. Oliveira; Xu, Min. (2008). *Plano Geral de Observação do Comportamento da Ponte sobre o rio do Sado na Variante de Alcácer do Sal da Linha do Sul*, Nota Técnica 3/2008-DE/NOE. Lisboa: LNEC.
- Teixeira Duarte, SA. (2009). *Verificação da segurança do tabuleiro na fase do lançamento incremental e na fase de construção dos arcos e pendurais sobre o tabuleiro*, Nota Técnica N°11 (proj.5446), Revisão B.