

Monitorização da ponte sobre o rio Kwanza na Cabala

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

Manuel Molares D'Abril
Laboratório de Engenharia de Angola, Director, Luanda, Angola

RESUMO: A presente comunicação visa divulgar os trabalhos de monitorização da nova ponte sobre o rio Kwanza, na localidade da Cabala, levados a cabo pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil e pelo Laboratório de Engenharia de Angola. Para além da apresentação do plano geral de observação e da descrição dos ensaios estáticos e dinâmicos realizados no final da construção, é dada uma ênfase particular a aspectos inovadores, como a monitorização do nível do rio e da evolução morfológica do seu leito em torno dos pilares e a solução adoptada para assegurar autonomia energética ao sistema de monitorização.

1 INTRODUÇÃO

A modernização em curso das infra-estruturas rodoviárias em Angola levanta diversos desafios, face às especificidades ambientais, dos materiais e das sobrecargas envolvidas. A observação do comportamento estrutural de uma ponte surge, assim, como uma excelente oportunidade de, para além de alcançar os objectivos associados à ponte em causa, obter informações que poderão ser de grande utilidade na construção ou reabilitação de outras obras de arte e, posteriormente, na previsível revisão da regulamentação nacional angolana.

Foi neste contexto que foi concebido o plano de observação da ponte sobre o rio Kwanza, situada junto à povoação da Cabala, na estrada entre Catete e Muxina, na província do Bengo, projectada pelo Eng^o Armando Rito (Rito & Cabral, 2009) e construída pela empresa Teixeira Duarte. A observação da ponte desta ponte visa a avaliação do desempenho da obra de arte, com base em valores directamente medidos *in situ*, bem como a detecção, em tempo oportuno, de eventuais deficiências do comportamento estrutural. Pretende-se também proceder ao estudo do comportamento diferido do betão, assim como à caracterização da evolução morfológica do leito em torno dos pilares.

As características da obra, bem como as diversas grandezas e as distintas técnicas experimentais utilizadas, proporcionaram a obtenção de um conjunto de resultados e ensinamentos cuja divulgação é o objectivo da presente comunicação.

Assim, após uma breve descrição da estrutura, apresenta-se, de uma forma sucinta, o plano observação implementado, referindo-se os equipamentos utilizados. Por fim descrevem-se os ensaios de carga realizados no final da construção.

2 DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A ponte da Cabala é uma obra de arte com uma extensão total de 1 534 m, que se divide em dois módulos contínuos e independentes, separados por uma junta: o módulo Norte, com um comprimento total de 760 m, é constituído pelo Viaduto de Acesso do lado Norte, com um tramo extremo de 24 m e seis tramos de 30 m, a ponte principal sobre o rio Kwanza, com um tramo central de 120 m e dois tramos laterais de 68 m, e um troço do Viaduto de Acesso do lado Sul com dez tramos de 30 m; o módulo Sul, com 774 m, é formado por 25 tramos de 30 m e um tramo extremo de 24 m.

O tabuleiro da ponte principal é constituído por uma viga contínua de betão armado e pré-esforçado, em caixão unicelular, com a largura de 14,60 m e uma altura que varia entre 7,00 m e 3,00 m. O tabuleiro dos viadutos de acesso é formado por uma laje vigada, de betão armado e pré-esforçado, com duas vigas de 3,00 m de altura.

Os pilares centrais da ponte principal têm uma forma elíptica e apoiam-se sobre maciços de encabeçamento de nove estacas com 1,50 m de diâmetro. Os pilares dos viadutos de acesso e os pilares de transição da ponte principal para os viadutos de acesso são do tipo pilar-estaca, em betão armado com uma secção transversal circular com diâmetro de 1,50 m, existindo dois pilares por secção de apoio. Estes pilares dispõem de aparelhos de apoio do tipo “pot bearing”, unidireccionais ou fixos.

A construção do tabuleiro da ponte principal foi efectuada a partir das aduelas de encabeçamento dos pilares por avanços sucessivos em consolas simétricas, através de dois troços de 3,70 metros, três troços de 4,20 metros e sete troços de 5,00 metros (Cabral, Rito, & Nobre, 2010). Na Figura 1 apresenta-se uma vista da ponte principal no final da construção, em Agosto de 2010. A Figura 2 refere-se aos viadutos de acesso.



Figura 1. Vista de montante da ponte sobre o rio Kwanza no final da construção.



Figura 2. Viadutos de acesso

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA PONTE

3.1 Considerações gerais

A monitorização da ponte da Cabala foi implementada ao longo da construção da ponte, de acordo com o respectivo plano (Santos & Rocha, 2009), compreendendo a medição de diversas grandezas que se podem agrupar da seguinte forma: comportamento estrutural da ponte, comportamento diferido do betão, condições ambientais e uma componente hidráulica, associada ao nível do rio e à evolução morfológica do seu leito. Os sensores que permitem a medição das diversas grandezas estão ligados a um sistema de aquisição que permite a realização automática das medições. Uma atenção particular foi dada à alimentação eléctrica, essencial ao funcionamento de todo o sistema de monitorização.

3.2 Comportamento estrutural da ponte

O comportamento estrutural da ponte está a ser monitorizado através da medição de deslocamentos verticais do tabuleiro, das rotações no topo dos dois pilares principais (P8 e P9) e das extensões no interior do betão.

A medição dos deslocamentos verticais nos tramos da ponte principal é efectuada através de um sistema de nivelamento hidrostático, associado a células de pressão. O sistema instalado compreende um depósito e uma célula de pressão de referência, ambos colocados sobre o pilar P9, para além de duas células em cada secção de meio vão dos três tramos, uma do lado de montante e outra do lado de jusante.

A medição das rotações é realizada através de clinómetros eléctricos aplicados sobre bases fixadas directamente sobre superfícies horizontais do betão. Estes clinómetros, que permitem a medição automática das rotações em duas direcções ortogonais, estão colocados no interior do caixão, sobre os pilares P8 e P9. Junto a estes clinómetros foram também colocadas bases para a medição de rotações através de clinómetros amovíveis.

A medição de extensões é efectuada através de extensómetros de corda vibrante instalados no interior do betão, em três secções do tabuleiro: a secção S1, localizada junto ao meio vão do tramo central, a secção S2, situada próximo do pilar P9, e a secção S3, próxima do fecho do tramo lateral sul da ponte.

Está igualmente a ser objecto de estudo o comportamento térmico do tabuleiro, tendo-se instalado, para este efeito, diversos termómetros eléctricos de resistência do tipo PT100. Estes sensores foram concentrados na secção S2, tendo sido colocados ao longo da espessura dos diversos elementos da secção, designadamente, nas lajes superior e inferior e nas almas. Na Figura 4 está representada, de forma esquemática, a localização dos sensores na secção S2.

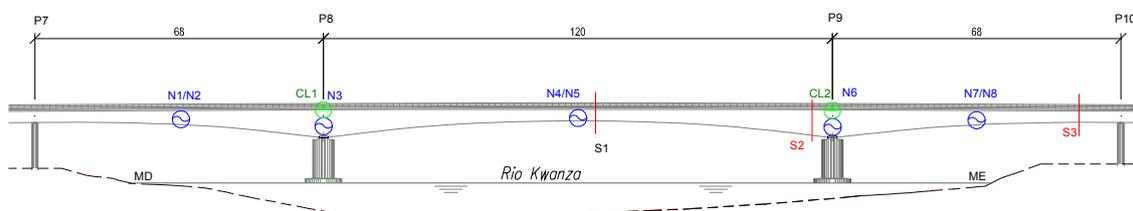


Figura 3. Localização das secções instrumentadas.

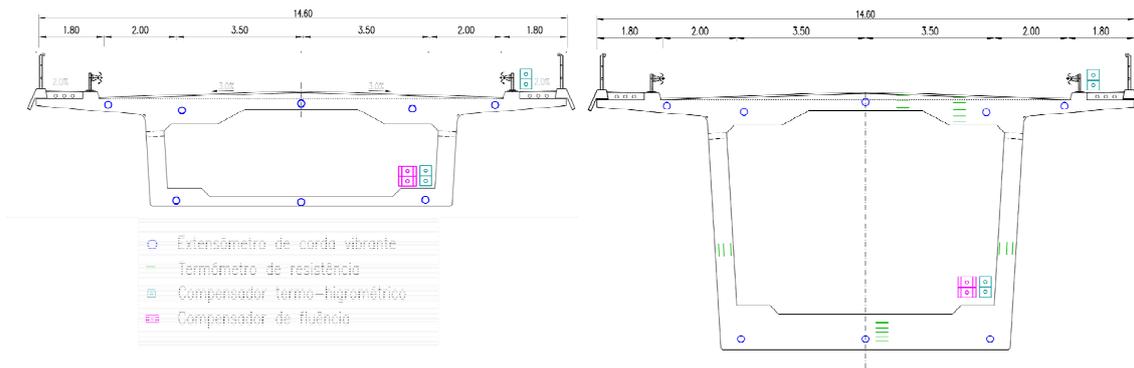


Figura 4. Secção instrumentada do tabuleiro (secção S2).

3.3 Comportamento diferido do betão

O estudo do comportamento diferido do betão *in situ*, envolve 23 provetes, executados em simultâneo com as três secções instrumentadas com extensómetros (S1 a S3) e que permanecem na obra de forma a estarem sujeitos às mesmas condições ambientais da estrutura.

O estudo da retracção baseia-se nas deformações ocorridas em 17 provetes termo-higrométricos mantidos em três ambientes diferentes: 6 no interior do caixão; 7 sobre o tabuleiro; e os restantes no topo do pilar P8, sob o tabuleiro, num ambiente exterior abrigado.

O estudo da fluência envolve seis provetes de fluência, dois em cada uma das secções S1 a S3, todos mantidos no interior do caixão.

Este estudo, que necessita de um período mais significativo de observação para ser conclusivo, poderá fornecer indicações importantes relativamente ao comportamento diferido do betão, fabricado e mantido em condições ambientais bem diversas das europeias.

3.4 Monitorização dos níveis de água do rio e da morfologia do fundo aluvionar do rio

A monitorização do nível de água do rio está a ser efectuada através de um sistema de radar instalado na parte inferior do tabuleiro da ponte, no tramo principal (Figura 5). Existindo diversos sistemas para este efeito, o facto de o sensor não estar submerso afigura-se como muito conveniente, uma vez que evita o embate dos sólidos transportados pelo rio, estando também mais protegido do vandalismo.

A monitorização da morfologia do fundo aluvionar do rio é efectuada com recurso a um sistema sonar, instalado do lado de montante do pilar P8, situado abaixo do nível mínimo das águas do rio e devidamente protegido. A necessidade de monitorizar apenas a parte de montante decorre do facto do escoamento durante a cheia ter um comportamento fluvial, circunstância em que a cavidade de erosão formada atinge maiores dimensões no lado de montante. Na Figura 5 apresenta-se uma vista do tubo de fixação do sensor que fica totalmente submerso.

A informação recolhida terá o maior interesse para apoiar uma eventual decisão de proteger o pilar e para adquirir dados sobre o comportamento real do fundo aluvionar durante a ocorrência de cheias, e ainda durante o ciclo de maré, se ela ocorrer.

3.5 Condições meteorológicas

A instalação de uma estação meteorológica possibilita a medição de diversos parâmetros meteorológicos locais, designadamente temperatura, humidade relativa do ar, pluviosidade, direcção e intensidade do vento.



Figura 5. Monitorização do nível de água (radar) e da morfologia do fundo aluvionar do rio (sonar).

3.6 Sistema de aquisição

A aquisição das leituras efectuadas por todos os transdutores instalados na ponte foi efectuada através de unidades datalogger Datalogger DT80G, tendo-se recorrido também a módulos de expansão CEM 20. Estas unidades de aquisição são controladas por um computador industrial ao qual está também ligado um router HSDPA que permite o acesso remoto à informação. Na Figura 6 apresenta-se uma vista do armário colocado sobre o pilar P8, que inclui as unidades de aquisição, designadamente, *loggers*, computador industrial e router.



Figura 6. Estação meteorológica e sistema de aquisição de dados.

3.7 Alimentação eléctrica

A adequada alimentação eléctrica é essencial ao funcionamento de todo o sistema de monitorização anteriormente apresentado. Para este efeito distinguiram-se duas situações: o período de construção e o funcionamento em serviço.

Durante a construção dispunha-se da energia de obra, fornecida por um gerador. Como é usual nestas circunstâncias, não se coloca a questão de falhas prolongadas de energia, mas sim da falta da sua necessária estabilidade. Para resolver esta questão, instalaram-se duas UPS com grande capacidade de armazenamento e protecção contra picos de corrente.

Após o final da construção, em que naturalmente deixou de haver fornecimento de energia à obra, foram instalados oito painéis fotovoltaicos, instalados junto à ponte, que associados a oito baterias, colocadas no interior do caixão, asseguram a alimentação de todo o sistema de monitorização, com grande estabilidade.

Na Figura 7 apresenta-se uma vista do sistema de painéis fotovoltaicos. Na mesma fotografia é visível o mastro, no topo do qual está colocada a estação meteorológica anteriormente referida.



Figura 7. Alimentação eléctrica através de um sistema de painéis fotovoltaicos associados a um conjunto de baterias

4 ENSAIOS DE CARGA

4.1 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos envolveram o ensaio dos três tramos da ponte, bem como três tramos do viaduto sul adjacentes à ponte. Os ensaios foram realizados em três fases distintas: inicialmente foi utilizada uma carga concentrada que se posicionou em diversas secções do tabuleiro; posteriormente foi utilizada uma carga rolante, que circulou a uma velocidade muito lenta ao longo do tabuleiro; finalmente, recorreu-se a uma sobrecarga distribuída. No dimensionamento das cargas de ensaio foi considerado o regulamento sul-africano utilizado no projecto (SATCC, 2001).

A carga concentrada e a carga rolante foram materializadas através de três camiões carregados, perfazendo uma carga total de 855 kN (Figura 8). Apesar de uma linha de influência ser, por definição, o efeito de uma carga rolante unitária, a elevada dimensão dos vãos desta obra faz com que o efeito resultante da aplicação do peso dos três camiões se assemelhe ao efeito da aplicação de uma carga pontual (Hirachan & Michael, 2005), pelo que foi possível com a realização destes ensaios a determinação de “linhas de influência” das grandezas observadas.

Tendo em vista ilustrar os resultados obtidos apresenta-se na Figura 9 a linha de influência de uma rotação, que inclui os valores obtidos através das posições de carga, que têm naturalmente um carácter discreto, os valores obtidos através da carga rolante e os valores obtidos numericamente. Na Figura 10 apresentam-se as linhas de influência das extensões na secção de meio-vão do tramo central.

A sobrecarga distribuída constituída por nove camiões carregados perfazendo um peso total de 2 637 kN foi sucessivamente colocada em seis posições diferentes. Pretendeu-se desta forma maximizar a resposta da estrutura, nomeadamente em termos deslocamentos verticais, rotações e de momentos flectores em diversas secções do tabuleiro. Finalmente, foram realizadas três posições com cargas excêntricas na via montante, tendo-se utilizado, para este efeito, apenas seis camiões, dispostos em duas colunas. Na Figura 11 a deformada correspondente à posição de carga em que se registou o maior deslocamento vertical do tabuleiro (23,7mm), medido na secção de meio-vão do tramo principal, quando o comboio de carga se

encontrava centrado nesse tramo (posição de carga 3). Nestas circunstâncias o valor previsto pelo modelo numérico foi de 26,8 mm.



Figura 8. Cargas de ensaio: carga concentrada e sobrecarga distribuída.

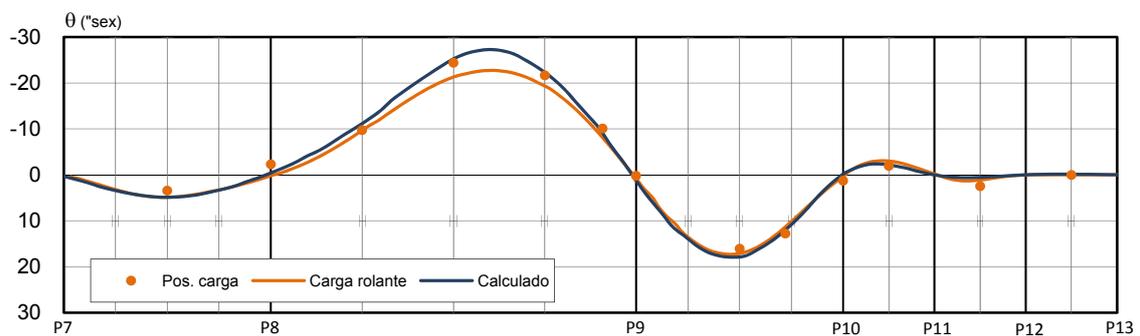


Figura 9. Linha de influência das rotações longitudinais do tabuleiro sobre o pilar P9.

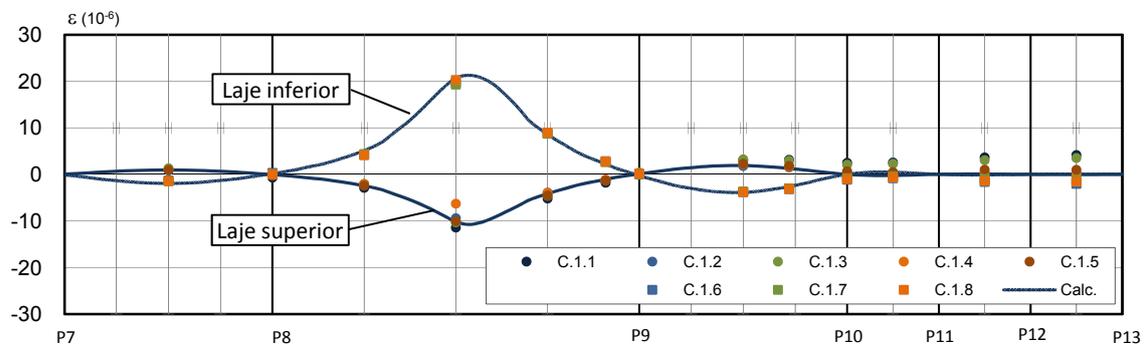


Figura 10. Linha de influência das extensões na secção S1.

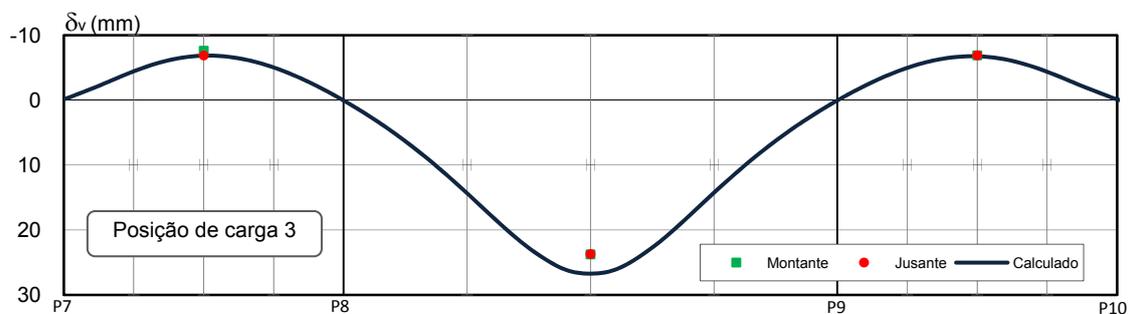


Figura 11. Deformada do tabuleiro com o comboio de cargas centrado na secção de meio vão.

Na generalidade das grandezas observadas verificou-se uma boa concordância entre os valores medidos e os valores previstos pelo modelo numérico idealizado.

4.2 Ensaios dinâmicos

Os ensaios de caracterização dinâmica tiveram como principal objectivo a avaliação experimental das características dinâmicas globais da estrutura, nomeadamente, as frequências dos seus principais modos de vibração, bem como os coeficientes de amortecimento. A técnica adoptada consistiu na medição de acelerações na estrutura, provocadas essencialmente pela acção do vento. Após os ensaios, os registos de acelerações foram analisados utilizando métodos de identificação modal estocástica, com vista a identificar as características dinâmicas da estrutura.

Os ensaios dinâmicos compreenderam a medição de acelerações nos três tramos da ponte. Para este efeito foram utilizados três macro-sismógrafos triaxiais. Um dos macro-sismógrafos permaneceu fixo ao longo do ensaio, tendo os restantes sido sucessivamente posicionados em 15 secções do tabuleiro (Figura 12). Em cada secção foram colocados dois aparelhos, um do lado de montante e outro do lado de jusante. Cada aparelho mediu simultaneamente a aceleração longitudinal, transversal e vertical.



Figura 12. Pontos instrumentados durante os ensaios dinâmicos.

Nestes ensaios foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 Hz para a aquisição dos registos de aceleração. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração total de 25 minutos.

A identificação das frequências naturais de vibração foi efectuada com base na análise dos auto-espectros dos registos de aceleração obtidos nos ensaios, tendo-se utilizado o programa LNEC-SPA (Mendes & Costa, 2007). Esta análise foi realizada de modo separado para as acelerações longitudinais, transversais e verticais do tabuleiro. Os registos assim obtidos foram objecto de um pré-processamento que consistiu na remoção da componente contínua ou de tendência lineares, na filtragem passa-banda com um filtro de tipo Butterworth de ordem 8 com frequências de corte de 0,2 Hz (passa-alto) e 12 Hz (passa-baixo) e na decimação dos registos para uma frequência de amostragem de 20,0 Hz. Com esta decimação, a frequência de Nyquist passou a ser de 10,0 Hz. A identificação modal subsequente foi desenvolvida até à frequência de 7,5 Hz e a resolução dos espectros foi de 0,0195 Hz.

Os valores das frequências dos primeiros modos de vibração identificadas foram de 1,152 Hz, relativa ao 1º modo vertical, e de 1,348 Hz, correspondente ao 1º modo transversal. Para estes modos de vibração obtiveram-se coeficientes de amortecimento de 1,4% e 3,8%, respectivamente. Apresenta-se na Figura 13 a densidade espectral de potência, com a indicação das frequências naturais do tabuleiro identificadas.

A comparação gráfica das frequências dos modos de vibração, obtidas por via experimental e numérica é apresentada na Figura 14. Caso essas frequências fossem exactamente iguais, os pontos representados no gráfico estariam colocados ao longo da recta de declive unitário e de ordenada na origem nula. Como se pode verificar, obteve-se uma concordância significativa nos modos de vibração transversais, entre as frequências calculadas e as identificadas experimentalmente. Para os modos

verticais as frequências identificadas experimentalmente são, em alguns casos, um pouco mais elevadas do que as calculadas.

Em síntese, os resultados experimentais adquiridos durante os ensaios permitiram a validação do modelo numérico da estrutura e a avaliação do seu comportamento estrutural, constituindo uma importante mais-valia.

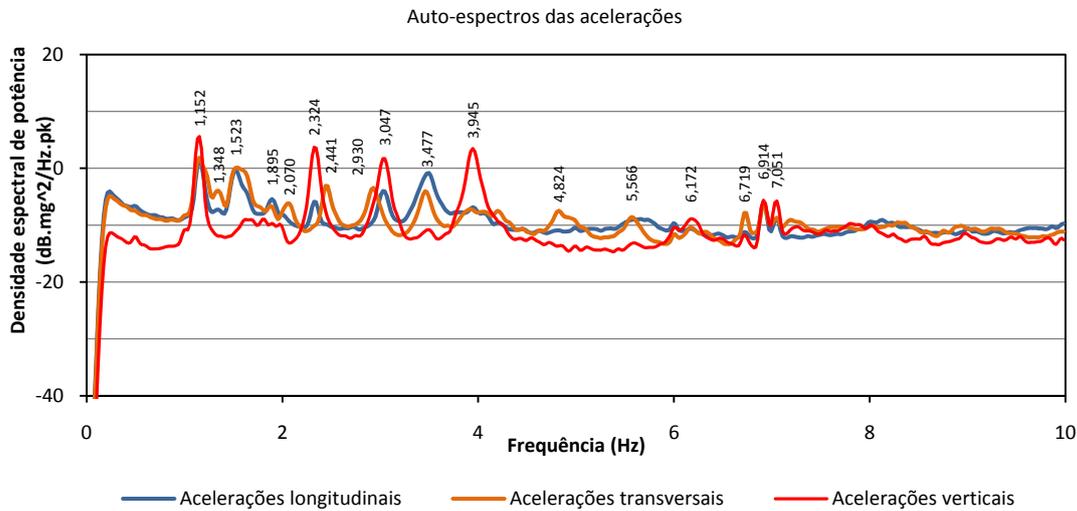


Figura 13. Identificação das frequências naturais do tabuleiro.

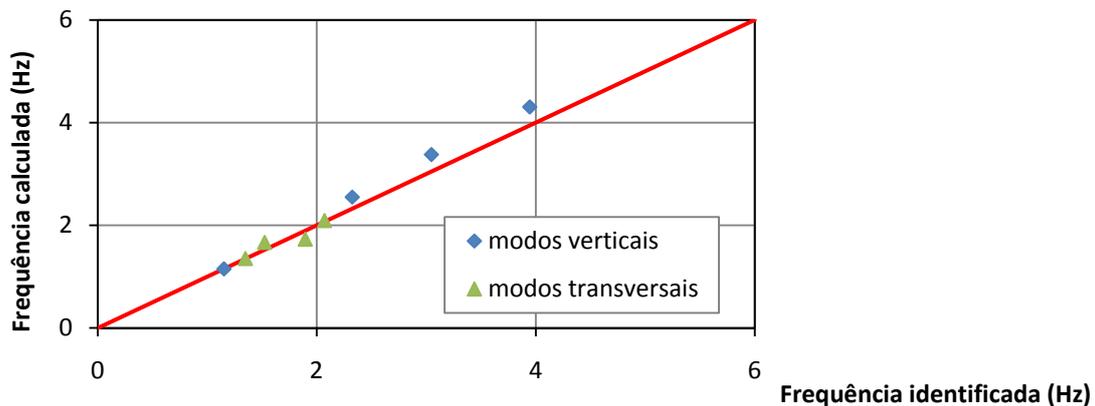


Figura 14. Comparação entre as frequências identificadas experimentalmente e calculadas.

5 CONCLUSÕES

A Ponte sobre o rio Kwanza, na Cabala, em Angola, foi instrumentada durante a construção tendo em vista a observação do seu comportamento estrutural durante esse período e em serviço.

O equipamento instalado compreende a medição de diversas grandezas estruturais, como deslocamentos verticais, rotações e extensões em diversas secções do tabuleiro da ponte, o estudo *in situ* do comportamento diferido do betão, a caracterização das condições meteorológicas, bem como a monitorização do nível do rio e da evolução morfológica do seu leito em torno dos pilares.

No final da construção, em Agosto de 2010, a ponte foi submetida a ensaios estáticos e dinâmicos. Durante os ensaios estáticos, foi utilizado o equipamento

integrado no sistema de monitorização estrutural da ponte, tendo-se recorrido a equipamento complementar para o ensaio de três tramos do viaduto sul. Nestes ensaios foram utilizados nove camiões carregados com um peso total de cerca de 2 637 kN.

A avaliação das características dinâmicas da ponte foi efectuada através de ensaios de medição de vibrações ambientais. A análise da informação experimental assim obtida foi realizada através da aplicação de um método de identificação modal estocástica. Estes procedimentos revelaram ser adequados, permitindo identificar um número significativo de modos de vibração.

A monitorização do comportamento estrutural da ponte sobre o rio Kwanza, na Cabala, para além dos benefícios directamente associados a esta obra, relativos à sua segurança e conservação, permitiu dar continuidade a uma parceria entre o LNEC e o LEA no âmbito da observação do comportamento de pontes (Santos, Xu, Silveira, & D'Abril, 2010). O trabalho desenvolvido no âmbito desta parceria permitirá a obtenção de conhecimentos sobre o comportamento diferido do betão, bem como das obras de arte, particularmente interessante por se tratar de materiais e de estruturas executados em condições específicas, nomeadamente ambientais, que poderão ser de grande utilidade na construção ou reabilitação de outras obras de arte e, posteriormente, na previsível revisão da regulamentação nacional angolana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Estradas de Angola (INEA) a possibilidade de apresentar a presente comunicação. Um agradecimento particular é devido aos Eng^{os} Armando Rito e Pedro Cabral, projectistas da obra, por todo o apoio recebido para a realização deste trabalho, à empresa Teixeira Duarte, construtora da obra de arte, pela colaboração empenhada, bem como aos colegas da Fiscalização, pelo apoio recebido.

6 REFERÊNCIAS

- Cabral, P., Rito, A., & Nobre, D. (2010). O Projecto e a Construção da Ponte sobre o rio. *Betão Estrutural 2010*.
- Hirachan, J., & Michael, C. (2005). "Experimental influence lines for bridge evaluation". *Bridges Structures , Vol. I, No 4, pp. 405-412*.
- Mendes, L., & Costa, A. C. (2007). *LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers – Version 1.0 - Build 12*. Relatório 29/2007– NESDE, LNEC.
- Rito, A., & Cabral, P. (2009). *Ponte sobre o rio Kwanza, Estrada Catete / Muxima. Projecto de execução*. Lisboa.
- Santos, L. O., & Rocha, J. (2009). *Plano Geral de Observação da Ponte sobre o rio Kwanza na estrada entre Catete e Muxima em Angola*. Lisboa: Nota Técnica 4/2009, LNEC.
- Santos, L. O., Xu, M., Silveira, P., & D'Abril, M. M. (2010). Observação e ensaio da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola. *Betão Estrutural 2010*. Lisboa.
- SATCC, S. A. *Standard Specifications for Road and Bridge Works*. 2001.