

Observação e ensaio da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola



L. Oliveira Santos¹



Xu Min²



Paulo Silveira³



M. Molares D'Abril⁴

RESUMO

A Ponte 4 de Abril é uma obra de arte atirantada que atravessa o rio Catumbela na via rápida entre Benguela e Lobito, em Angola. As características da obra, bem como a sua importância no sistema rodoviário, levaram o Instituto de Estradas de Angola a proceder à monitorização do seu comportamento estrutural.

Neste sentido o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e o Laboratório de Engenharia de Angola estabeleceram uma parceria visando a instalação de um sistema que permitisse a monitorização da estrutura bem como a realização de ensaios estáticos e dinâmicos no final da construção.

Na presente comunicação apresenta-se o plano de observação implementado e descrevem-se os ensaios realizados, apresentando-se alguns dos resultados obtidos que são comparados com os valores calculados através do modelo numérico desenvolvido para o planeamento dos ensaios e interpretação dos seus resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Observação, ensaios de carga, monitorização estrutural, ponte atirantada.

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departam. de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. Luis.osantos@lnec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. XuMin@lnec.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Depart. de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. Paulo.Silveira@lnec.pt

⁴ Laboratório de Engenharia de Angola, Director, Caixa Postal 6500, Luanda, Angola

1. INTRODUÇÃO

Por ter sido considerado que a observação e ensaio de uma ponte atirantada, em Angola, constituiriam um importante incentivo para o relançamento da actividade de investigação no domínio da Engenharia Civil, neste país, foi estabelecida, para este efeito, uma parceria entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil e o Laboratório de Engenharia de Angola. A escolha desta obra deveu-se às suas características, referência de modernidade e progresso em Angola, sendo assim, perfeitamente adequada para permitir contrariar, a pouca expressão que, até então, a análise experimental de pontes tinha neste país.

A Ponte 4 de Abril atravessa o rio Catumbela junto à vila com o mesmo nome, estando integrada na via rápida que liga Benguela e Lobito. Projectada pelo Eng^o Armando Rito [1], a sua construção, efectuada pelo consórcio Mota-Engil/Soares da Costa, decorreu entre Julho de 2007 e Julho de 2009.

As características da obra, bem como os diversos ensaios realizados 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 e do modelo numérico desenvolvido para simular o seu comportamento durante os ensaios, descrevem-se os ensaios estáticos e dinâmicos realizados, referindo-se os equipamentos utilizados e a forma como foi efectuado o tratamento dos resultados. Finalmente, apresentam-se alguns dos resultados obtidos que são comparados com os valores calculados com o modelo numérico utilizado.

2. DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A Ponte sobre o rio Catumbela é uma obra atirantada de suspensão total, que forma uma estrutura contínua com os viadutos de acesso em ambas as margens do rio, perfazendo uma extensão total de 438 m [2].

A ponte, em betão armado pré-esforçado, é constituída por duas torres em forma de U, com cerca de 46 m de altura, e por três vãos suspensos através de tirantes dispostos em semi-harpa. O comprimento do vão central é de 160 m e dos tramos laterais é de 64 m. Os viadutos de acesso são constituídos por tramos de betão armado pré-esforçado com vãos de 30 m, sendo três situados na margem esquerda e dois na margem direita.



Figura 1. Vista geral da ponte 4 de Abril.

O tabuleiro da ponte, com 24,5 m de largura, é formado por uma laje dotada de duas nervuras longitudinais, aligeiradas, dispondo ainda de carlingas espaçadas de 4,0 m.

As torres são em betão armado pré-esforçado, fundadas através de estacas encimadas por maciços de encabeçamento, ligados por vigas transversais pré-esforçadas.

Os tirantes são constituídos por feixes paralelos de cordões de aço, de 15,7 mm de diâmetro, auto-protetidos, ancorados no tabuleiro, com um afastamento de 8,0 m entre si. Os primeiros três tirantes estão ancorados nas torres, enquanto os restantes sete passam nas torres através de selas.

O tabuleiro dos viadutos de acesso é idêntico ao tabuleiro da ponte, apoiando-se nos pilares e encontros através de aparelhos de apoio do tipo “pot”, deslizantes nas duas direcções. Os pilares têm faces elípticas e são fundados sobre um grupo de quatro estacas de 1,20 m de diâmetro.

3. MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

3.1 Plano de observação

Durante a construção a ponte foi instrumentada com uma série de equipamento para medição de várias grandezas que permitem a observação do comportamento da estrutura a longo prazo. Para este efeito foram instrumentadas duas secções do tabuleiro, designadamente com extensómetros de corda vibrante e termómetros eléctricos de resistência embebidos no betão, cuja localização está representada na Figura 2. A Figura 3 exemplifica a instrumentação de uma secção transversal do tabuleiro com extensómetros de corda vibrante.

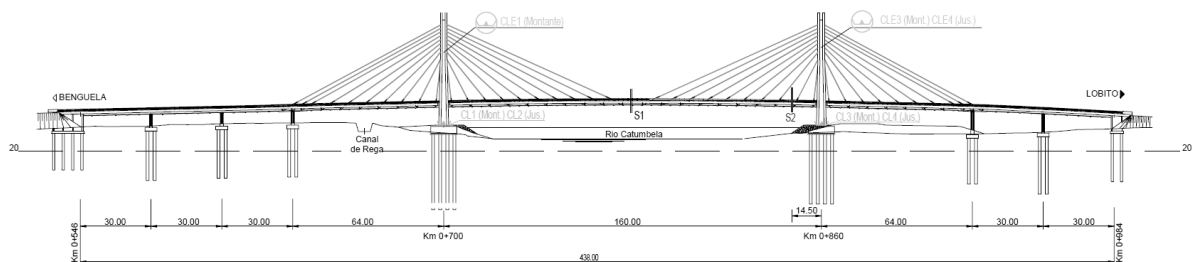


Figura 2. Plano geral de observação da ponte.

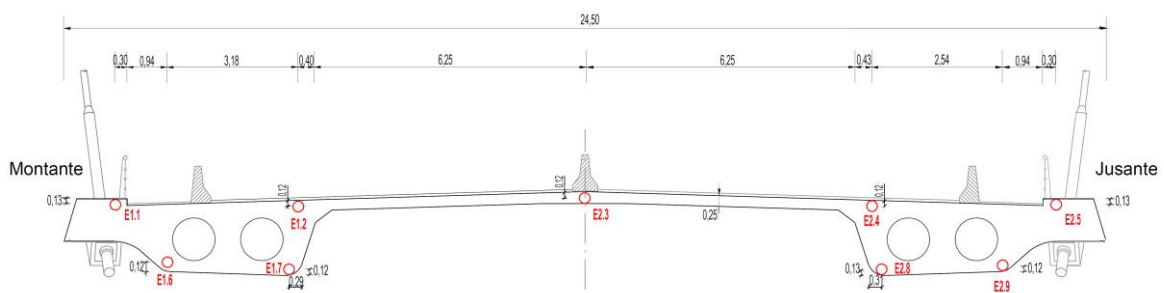


Figura 3. Secção instrumentada (disposição dos extensómetros de corda vibrante).

A medição de rotações foi assegurada através da instalação de clinómetros eléctricos nos mastros, concretamente na zona de ancoragem do 3º tirante, e de bases de clinómetro amovível na base de cada mastro.

Para estudar o comportamento diferido do betão *in situ* foram executados 9 provetes termohigrométricos e 3 provetes de fluência, que permanecem na obra de forma a estarem sujeitos às mesmas condições ambientais da estrutura. Este estudo, que necessita de mais algum tempo para ser conclusivo, poderá fornecer indicações importantes relativamente ao comportamento diferido do betão, fabricado e mantido em condições ambientais bem diversas das europeias.

A aquisição das leituras foi efectuada de forma automática através de unidades de *data logger*, sendo a comunicação remota efectuada através de um router HSDPA.

3.2 Observação durante a construção e em serviço

O volume de dados recolhidos e o reduzido espaço disponível apenas permitem a apresentação de uma pequena parte dos resultados, pelo que, a título ilustrativo, se incluem na Figura 4 os valores das extensões na laje do tabuleiro, medidas na secção de meio vão.

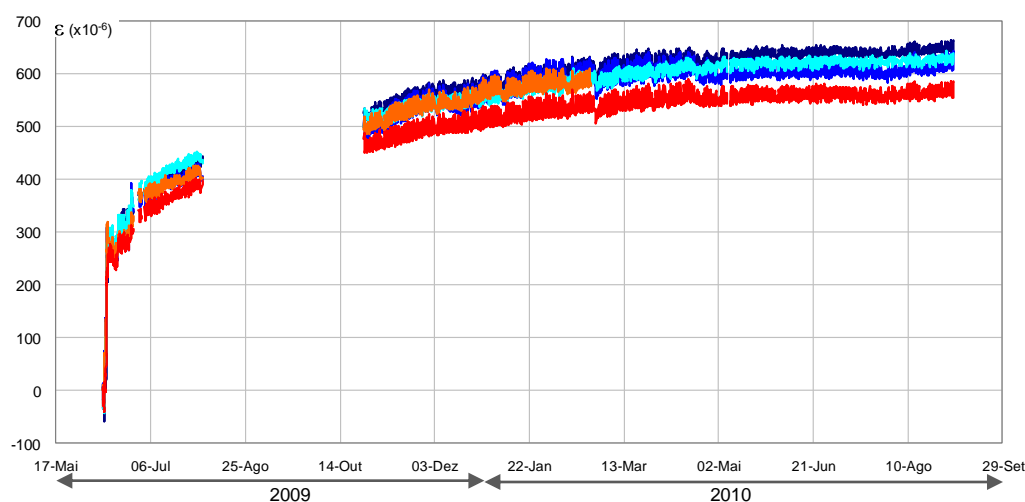


Figura 4. Secção S1: resultados durante a construção e em serviço.

4. ENSAIOS DE CARGA

4.1 Considerações gerais

O comportamento estrutural da ponte foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, tendo-se recorrido ao programa SAP2000 [3] para estimar a resposta da estrutura durante a realização dos ensaios. Utilizaram-se elementos finitos de casca na modelação da laje do tabuleiro e elementos de barra na simulação das vigas, carlingas pilares e torres. A representação gráfica do modelo estrutural idealizado é efectuada na Figura 5.

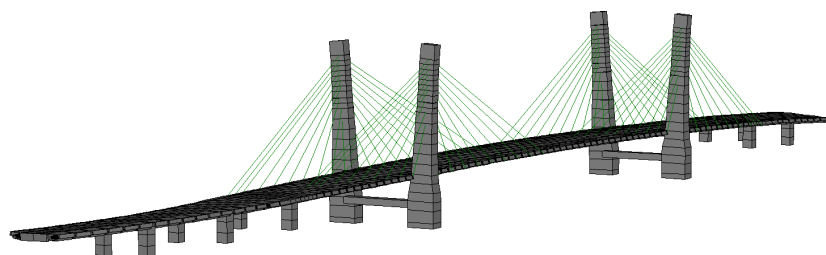


Figura 5. Modelo de cálculo.

4.2 Ensaios estáticos

4.2.1 Ensaios realizados

Os ensaios estáticos envolveram o ensaio dos tramos suspensos, bem como dos tramos adjacentes. 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 (Figura 7).

A carga concentrada e a carga rolante foram materializadas através de quatro camiões carregados, perfazendo uma carga total de 1 277 kN (Figura 6). 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 quatro camiões utilizados se assemelhe ao da aplicação de uma carga pontual [4], pelo que foi possível com a realização destes ensaios a determinação de “linhas de influência” das grandezas observadas.

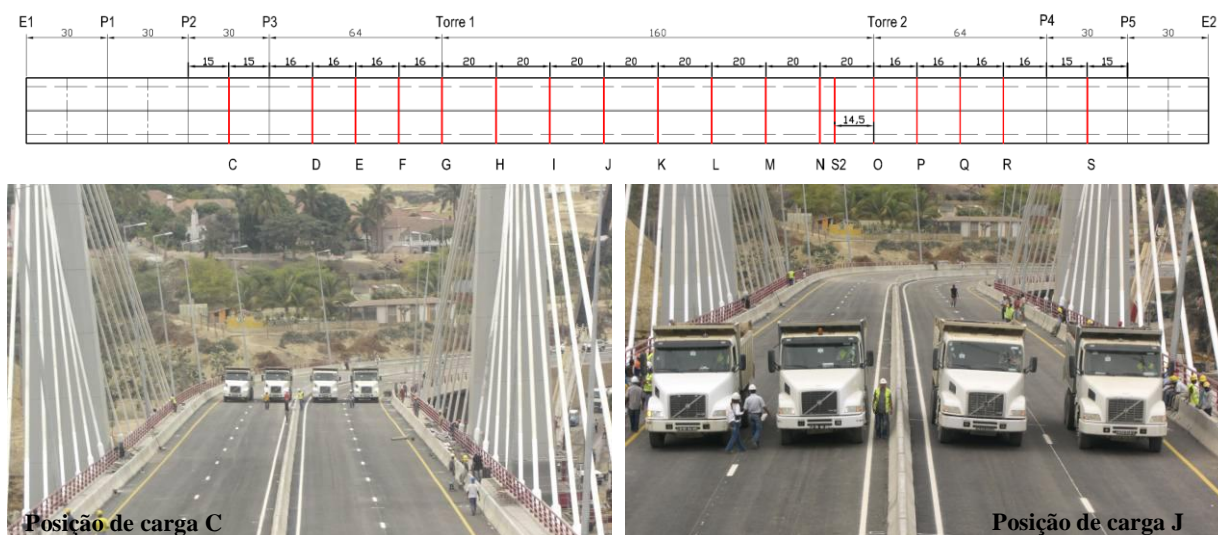


Figura 6. Carga concentrada: definição das posições de carga.

A carga distribuída constituída por dezasseis camiões carregados perfazendo um peso total de 5 107 kN foi sucessivamente colocada em onze posições diferentes (Figura 7). 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 cinco posições com cargas excêntricas na via montante, tendo-se utilizado, para este efeito, apenas oito camiões, dispostos em duas colunas. Estes ensaios foram realizados de noite, de forma a minimizar o efeito da temperatura.



Figura 7. Comboio de carga no decurso dos ensaios estáticos.

4.2.2 Equipamento utilizado

Para o ensaio da ponte, foi utilizado o equipamento instalado durante a construção tendo em vista a observação do comportamento estrutural a longo prazo que foi complementado com equipamento montado especificamente para o ensaio. Este equipamento complementar incluía dois sistemas de nivelamento hidrostático, para medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro, dois clinómetros eléctricos para medição de rotações no tabuleiro, e quatro acelerómetros uniaxiais de tipo piezoeléctrico, para medição da força instalada em tirantes através do método da vibração [5].

Em síntese, no decurso do ensaio estático foram medidos deslocamentos verticais, rotações e extensões em diversas secções do tabuleiro, bem como rotações nas duas torres e forças em quatro tirantes. Foi também controlada a evolução das temperaturas ambiente e no interior do betão.

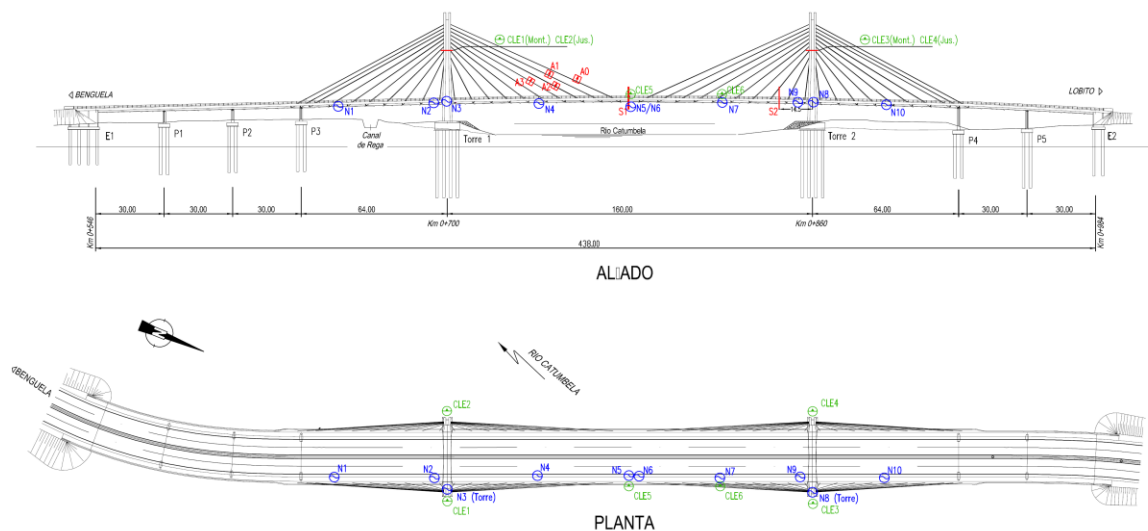


Figura 8. Instrumentação para os ensaios estáticos.

4.2.3 Resultados obtidos

Os ensaios estáticos realizados com a carga concentrada permitiram obter experimentalmente as linhas de influência das diversas grandezas medidas. Tendo em vista ilustrar os resultados obtidos apresenta-se a linha de influência de um deslocamento vertical (Figura 9), de uma rotação (Figura 10) e das extensões no interior do betão (Figura 11). Estas figuras incluem os valores obtidos através das posições de carga referidas, que têm naturalmente um carácter discreto, os valores obtidos através da carga rolante e os valores determinados através do modelo numérico.

Na Figura 12 apresenta-se a deformada correspondente à posição de carga em que se registou o maior deslocamento vertical do tabuleiro (10,4 cm), medido na secção de meio-vão do tramo central, quando o comboio de carga se encontrava centrado nesse tramo. Nestas circunstâncias o valor previsto pelo modelo de cálculo foi de 10,7 cm.

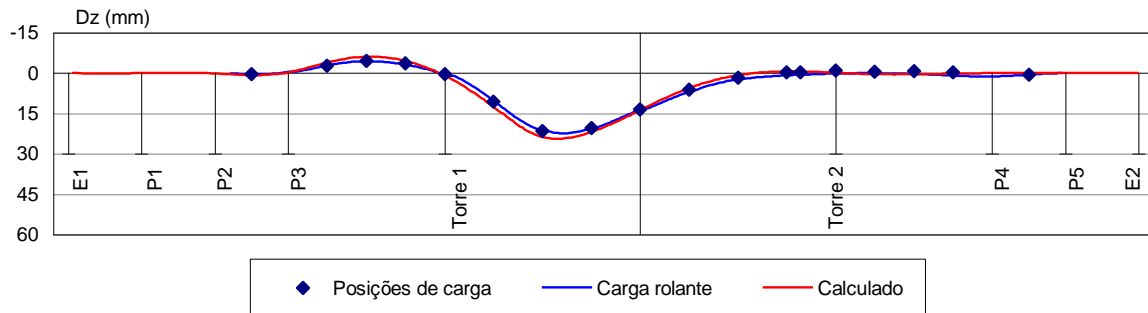


Figura 9. Linha de influência dos deslocamentos verticais no $\frac{1}{4}$ vão central.

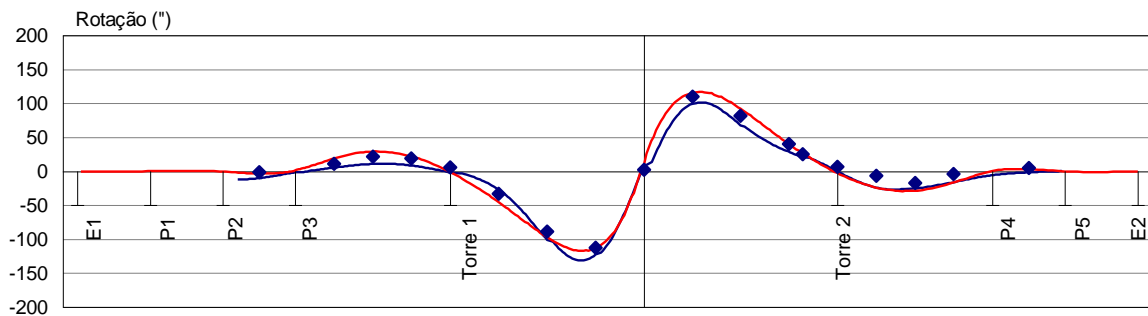


Figura 10. Linha de influência das rotações a $\frac{1}{2}$ do vão central.

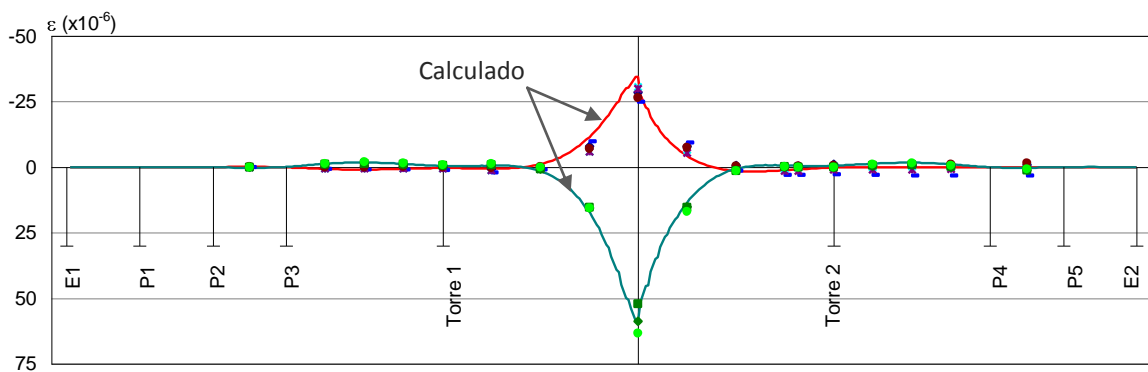


Figura 11. Linha de influência das extensões no betão na secção de $\frac{1}{2}$ vão do tramo central (S1)

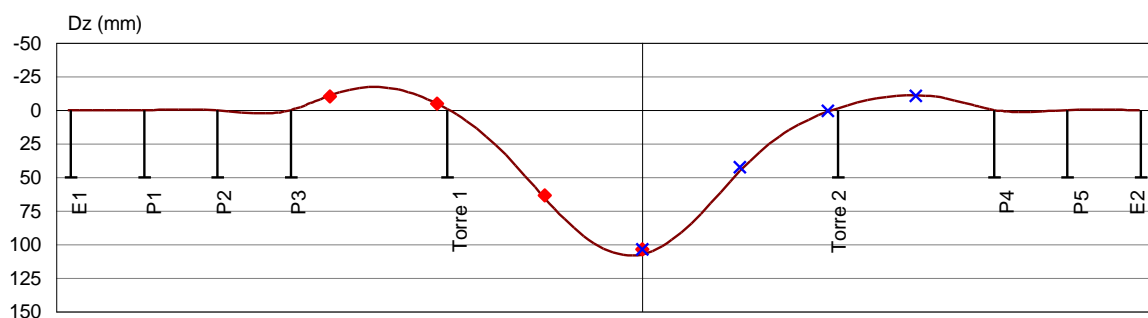


Figura 12. Deformada do tabuleiro com o comboio de cargas centrado na secção de meio vão

4.3 Ensaio 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 tramos suspensos bem como no topo das torres. No total foram instrumentadas 17 secções do tabuleiro, tendo-se colocado dois macrosismógrafos GeoSig GSR-16, em cada secção, um do lado de montante e outro de jusante. Foram também medidas as acelerações no topo dos quatro mastros das duas torres. Cada macrosismógrafo mediu as acelerações longitudinal, transversal e vertical. A localização dos pontos instrumentados está esquematicamente apresentada na Figura 13.

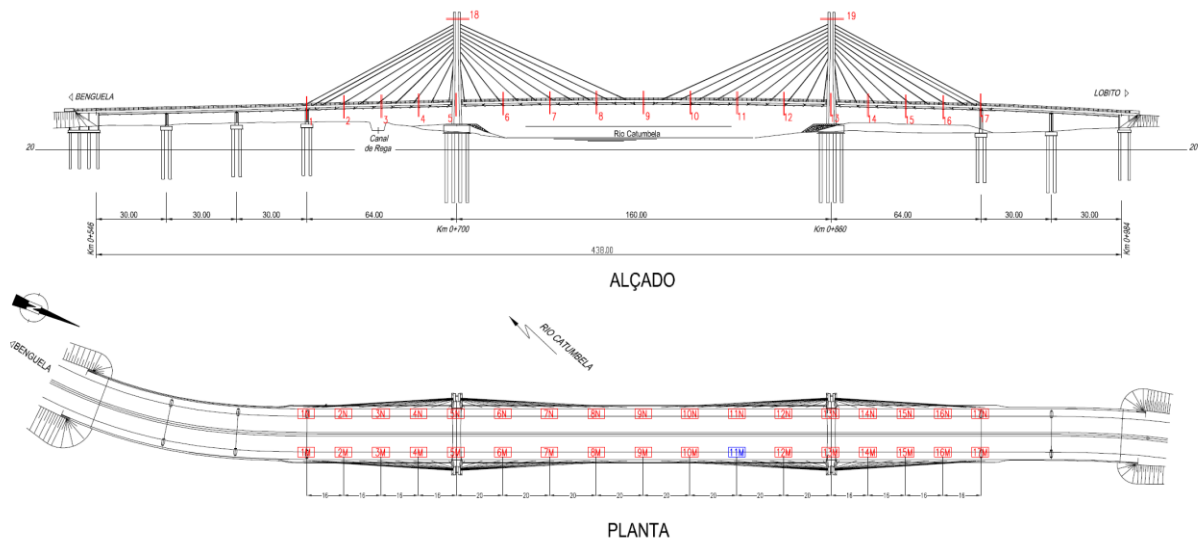


Figura 13. Pontos instrumentados durante os ensaios dinâmicos

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 cerca de 36 minutos.

A identificação das frequências naturais de vibração da Ponte Catumbela foi efectuada com base na análise dos auto-espectros dos registos de aceleração obtidos nos ensaios. Foi utilizada a ferramenta implementada no programa LNEC-SPA [6].

Quando uma estrutura é excitada por acções como vento ou tráfego, a sua resposta tem uma maior intensidade nas frequências dos seus modos naturais de vibração que correspondem aos picos de ressonância nos espectros normalizados médios dos registos (ANPSD). No entanto, é necessário confirma-los, tendo em conta a coerência entre vários espectros dos registos obtidos em diferentes pontos e ensaios. Para uma ponte atirantada, os modos de vibração do tabuleiro interagem com os modos das torres, o que também ajuda a identificar as frequências naturais da estrutura.

A identificação das frequências naturais da estrutura foi efectuada de modo separado para as acelerações longitudinais, transversais e verticais do tabuleiro, assim como para as acelerações longitudinais e transversais obtidas nos topos das torres. Com a decimação dos sinais para uma frequência de 25,0 Hz, a frequência de Nyquist passou a ser de 12,5 Hz. A identificação modal subsequente foi desenvolvida até à frequência de 4,0 Hz. A resolução dos espectros é de 0,0122 Hz.

As frequências dos primeiros modos de vibração foram: 0,55 Hz (vertical), 0,70 Hz (transversal) e 1,04 Hz (torção).

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 verticais, entre as frequências calculadas e as identificadas experimentalmente. Para os modos transversais as frequências identificadas experimentalmente são, em alguns casos, um pouco mais elevadas do que as calculadas.

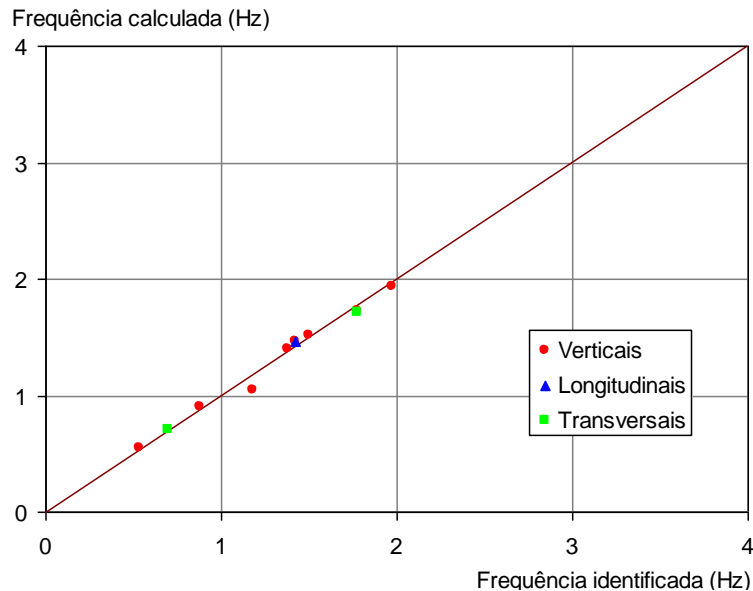


Figura 14. Comparação entre as frequências identificadas experimentalmente e calculadas

5. CONCLUSÕES

A Ponte 4 de Abril foi instrumentada durante a construção tendo em vista a observação do seu comportamento estrutural a longo prazo. No final da construção esta obra de arte foi submetida a ensaios estáticos e dinâmicos.

Durante os ensaios estáticos, o sistema de monitorização estrutural existente, juntamente com o equipamento complementar montado especificamente para os ensaios, permitiram a medição de deslocamentos verticais do tabuleiro, deslocamentos horizontais das torres, rotações no tabuleiro e nas torres, extensões e temperaturas em duas secções, bem como das forças instaladas nos tirantes. Nestes ensaios foram utilizados dezasseis camiões carregados com um peso total de cerca de 5100 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.

Os resultados experimentais adquiridos durante os ensaios foram utilizados para validar o modelo numérico desenvolvido e para a avaliação do comportamento estrutural da ponte. Em geral, as diferenças entre os valores medidos e calculados foram inferiores a 5%. A calibração do modelo

estrutural foi uma mais-valia significativa da realização dos testes, uma vez que possibilita a sua utilização para a interpretação futura do comportamento desta obra.

A monitorização do comportamento estrutural, para além dos benefícios que lhe estão normalmente associados, como a segurança e conservação das pontes observadas, permitirá a obtenção de um conhecimento sobre o comportamento diferido do betão, bem como da obra de arte, que será particularmente interessante por se tratar de um material e de uma obra executados em condições muito diferentes das que se verificam no continente europeu, e sobre as quais há ainda pouca informação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Estradas de Angola (INEA) a possibilidade de apresentar a presente comunicação. Um agradecimento particular é devido ao Eng^o Armando Rito, projectista da obra, por todo o apoio recebido para a realização deste trabalho. Finalmente, uma palavra de reconhecimento para o apoio recebido da Fiscalização, nas pessoas dos Eng^{os} José Plácido, Arménio Silva e Rita Monteiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Rito, Armando; Cabral, Pedro – Nova ponte sobre o rio Catumbela. Via rápida Benguela / Lobito. Projecto de execução, Setembro de 2007.
- [2] Rito, Armando; Cabral, Pedro; Xavier, Luís – “A Nova Ponte sobre o rio Catumbela, em Angola”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*, Guimarães, Novembro de 2008.
- [3] CSI – SAP2000 – Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, 2000.
- [4] Hirachan, Jasmeen, Chajes, Michael – “Experimental influence lines for bridge evaluation”, *Bridges Structures*, Vol. I, No 4, pp. 405-412, Taylor & Francis, December 2005.
- [5] Mehrabi A.B., Tabatabai H. Unified Finite Difference Formulation for Free Vibration of Cables – *Journal of Structural Engineering*, November 1988, p.1313-1322.
- [6] Mendes, L.; Campos Costa, A. – *LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers – Version 1.0 - Build 12*, Relatório 29/2007– NESDE, LNEC, 2007.
- [7] Santos, L. Oliveira – *Plano Geral de Observação da Ponte sobre o rio Catumbela na via rápida entre Benguela e Lobito em Angola*, Nota Técnica 2/2008-NOE, LNEC, 2008.
- [8] Santos, L. Oliveira; Min, Xu; Silveira, Paulo – *Ensaio de carga da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela na via rápida entre Benguela e Lobito em Angola*, Relatório 312/2009-NOE, LNEC, 2009, 55 p.