

# Sistema integrado de monitorização da integridade estrutural e da durabilidade da Ponte da Ribeira D'Água na ilha da Boa Vista, em Cabo Verde

Luís Oliveira Santos

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa*

José Varela

*Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde, Praia*

Elsa Pereira

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Lisboa*

**RESUMO:** Apresenta-se o sistema integrado de monitorização da integridade estrutural e da durabilidade da nova Ponte da Ribeira D'Água na ilha da Boa Vista, instalado face ao carácter inovador de que se reveste a sua construção em Cabo Verde e pela sua importância estratégica na ilha.

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas integrados de monitorização da integridade estrutural e da durabilidade, para além de permitirem verificar o desempenho a longo prazo de infraestruturas de transporte, são reconhecidos como importantes ferramentas de apoio à definição de estratégias de manutenção e reparação. Os custos de instrumentação são, contudo, elevados e a utilização deste tipo de sistemas tem-se restringido a obras selecionadas.

Assiste-se atualmente ao desenvolvimento de sistemas de monitorização inovadores, mais económicos e flexíveis, que incorporam desenvolvimentos tecnológicos em termos de digitalização, condicionamento e transmissão dos sinais, que possibilitam uma utilização mais alargada deste tipo de recurso e a sua utilização no aumento do ciclo de vida de outro tipo de estruturas (Chen *et al*, 2014; Inaudi *et al*, 2010).

Nesta comunicação apresenta-se o sistema de monitorização da integridade estrutural e da durabilidade instalado na nova ponte sobre a Ribeira D'Água na ilha da Boa Vista em Cabo Verde. Apesar de ser uma ponte de dimensões moderadas, é uma obra da maior importância para a circulação rodoviária nesta ilha, assegurando a ligação entre Sal Rei, a sede do município, e o aeroporto internacional, bem como a ligação à maioria das instalações turísticas da ilha. A relevância económica e social desta ponte, associada ao regime torrencial que caracteriza a bacia hidrológica desta ribeira, que muito contribuiu para a derrocada de uma ponte no mesmo local em 2012, foi determinante na decisão de instrumentar pela primeira vez uma ponte em Cabo Verde. Para além disso, a obtenção de conhecimentos sobre o comportamento diferido do betão, sobre o comportamento estrutural, bem como dos aspetos associados à durabilidade dos materiais reveste-se de particular interesse por se tratar de materiais e de uma estrutura executados em condições específicas, nomeadamente ambientais, podendo, futuramente ser de grande utilidade na construção ou reabilitação de outras obras de arte em Cabo Verde.

O sistema de monitorização, instalado em agosto de 2014, foi concebido tendo em atenção as características da obra e o orçamento disponível e compreende quatro

vertentes: a medição das condições meteorológicas, o estudo *in situ* do comportamento diferido do betão, a monitorização do comportamento estrutural e da durabilidade. Os sensores de durabilidade foram especialmente desenhados para o efeito e a aquisição, transmissão e processamento dos valores medidos são efetuados de forma integrada e automática, através de equipamento de aquisição e de comunicação especialmente selecionado, de forma a minimizar o custo total do sistema.

## 2 DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A Ponte sobre a Ribeira D'Água é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, contínua ao longo da sua extensão de 97 m, constituída por cinco tramos: o vão central de 25 m, dois vãos adjacentes de 20 m e vãos extremos de 16 m (Figura 1).



Figura 1. Vista de jusante da ponte.

O tabuleiro, com uma largura de 11,40 m, acomoda uma faixa de rodagem com duas vias, duas bermas e passeios laterais. Estruturalmente é constituído por uma laje nervurada em betão armado pré-esforçado com uma nervura de 1,20 m de altura e uma largura de 5,50 m na sua base, que se prolonga lateralmente em consolas de betão armado, de espessura variável, com 2,45 m de comprimento.

Os quatro pilares, em betão armado, possuem uma secção transversal retangular, chanfrada nos topos de forma a melhorar o seu comportamento hidrodinâmico, com uma altura de 0,80 m e uma largura que varia entre 3,00 m, na base, e 5,00 m, no topo (Bispo *et al*, 2014). A fundação dos pilares é indireta, existindo para cada pilar um conjunto de seis estacas com 0,80 m de diâmetro.

Os encontros da ponte são em betão armado, constituídos por montantes e muros de avenida encimados pela viga de estribo. O encontro E1, do lado de Rabil, tem uma fundação direta por intermédio de uma sapata, enquanto a fundação do encontro E2, do lado de Sal Rei, é indireta por intermédio de estacas com 0,80 m de diâmetro.

A ligação do tabuleiro aos quatro pilares é rígida, enquanto nos encontros se processa através de aparelhos de apoio em elastómero cintado.

O tabuleiro foi construído tramo-a-tramo pelo processo de cavalete apoiado no solo, tendo sido betonado em cada fase um tramo e uma consola do tramo seguinte com cerca de um quinto do comprimento desse tramo (Bispo *et al*, 2014).

### 3 O SISTEMA INTEGRADO DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL E DA DURABILIDADE

#### 3.1 Monitorização das condições ambientais

A medição das condições meteorológicas ambientais, designadamente a temperatura e a humidade relativa, é realizada através de um sensor de temperatura e humidade relativa do ar instalado na carlinga do encontro E1. Desta forma é possível ter em consideração a influência destas grandezas na maturação do betão, na evolução do comportamento diferido do betão e, de uma forma geral, no comportamento estrutural, bem como nas medições dos parâmetros relativos à durabilidade do betão.

Na Figura 2 apresenta-se, a título de exemplo, a evolução da temperatura medida durante o mês de setembro de 2014, em que se registaram as temperaturas mais elevadas desde que o sistema foi instalado.

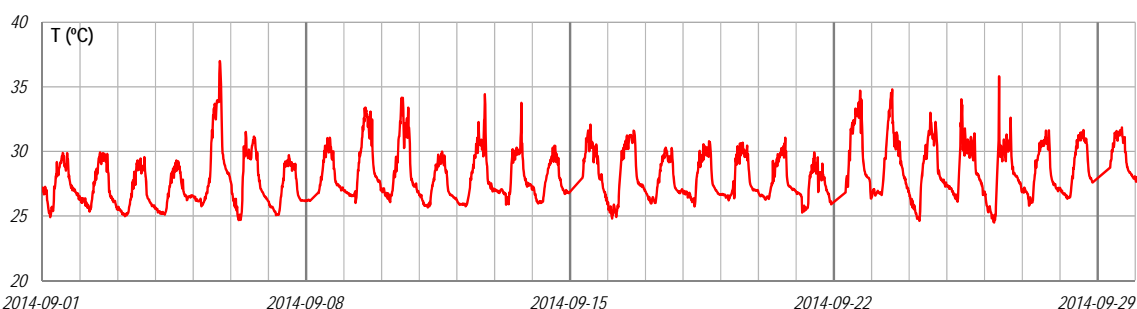


Figura 2. Temperatura ambiente em setembro de 2014.

#### 3.2 Estudo do comportamento diferido do betão

A retração e a fluência do betão são fenómenos fortemente influenciados pelas condições ambientais a que o betão está exposto, para além das propriedades intrínsecas do material, incluindo os seus componentes, as características da mistura e as condições de fabrico e cura. A caracterização *in situ* da retração e da fluência tem, pois, interesse tanto do ponto de vista da própria obra como, numa perspetiva mais geral, pela relevância da informação obtida para futuras obras em Cabo Verde.

Para este efeito foram executados seis provetes, com espessura equivalente de 22,5 cm, betonados em simultâneo com o terceiro tramo do tabuleiro, no interior dos quais foi instalado um extensómetro de corda vibrante com um termistor incorporado.

Os provetes destinados à caracterização da retração não foram sujeitos a qualquer tipo de carregamento, pelo que as suas deformações são devidas apenas à retração e às variações de temperatura. Os restantes provetes, reservados ao estudo da fluência, foram submetidos a uma tensão constante, aplicada por um macaco hidráulico plano, tendo-se recorrido, para este efeito, a pórticos metálicos designados estruturas de fluência (Figura 3). Todos os provetes foram mantidos na estrutura, para ficarem sujeitos às mesmas condições ambientais, tornado possível identificar as deformações de fluência pela diferença entre as deformações medidas nos dois tipos de provetes.

A evolução das extensões medidas nos compensadores termo-higrométricos está representada na Figura 4, juntamente com as curvas de retração resultantes do modelo de previsão do EC2 (IPQ, 2001), considerando uma humidade relativa de 50% e 60% e cimento de classe R. Constata-se que a evolução da retração dos três provetes é semelhante, com um andamento homotético relativamente à curva do EC2 mas com valores mais elevados, mesmo para valores de humidade relativa tão baixos.

A Figura 5 é constituída pelos coeficientes de fluência pelos coeficientes de fluência relativos ao módulo de elasticidade aos 28 dias, para uma idade de carregamento de 3

dias, verificando-se que os valores experimentais assumem valores francamente menores do que os provenientes do modelo do EC2.



Figura 3. Provetes para a caracterização *in situ* da retração e da fluência do betão.

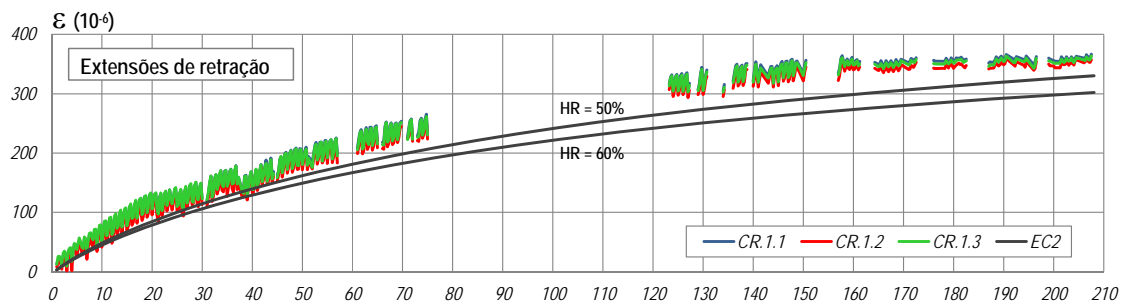


Figura 4. Extensões medidas nos provetes compensadores termo-higrométricos.

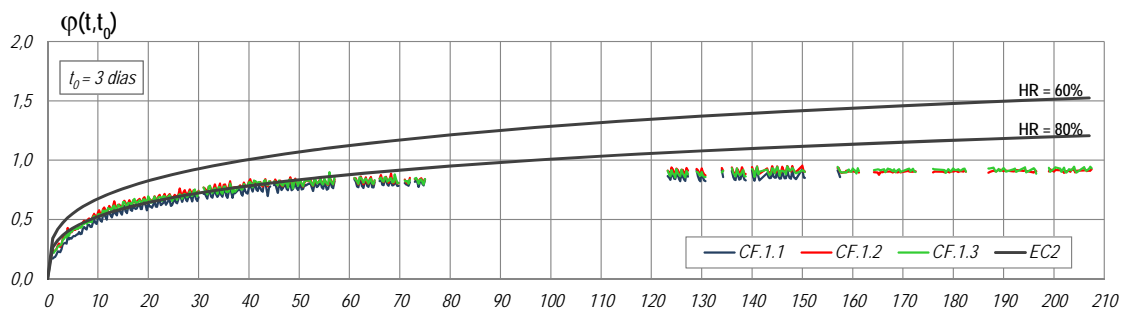


Figura 5. Coeficientes de fluência.

### 3.3 Monitorização do comportamento estrutural

A monitorização do comportamento estrutural da ponte compreende a medição de extensões e temperaturas no interior do betão, que se conjuga com a medição pontual de deslocamentos verticais e da abertura de juntas de dilatação.

As extensões e a temperatura no interior do betão são medidas de forma contínua e automática. No primeiro caso, recorreu-se a extensómetros de corda vibrante com termistor incorporado, que foram colocados em duas secções do tramo central, no meio vão e próximo de um apoio, como está assinalado na Figura 6.

As temperaturas no interior do betão são medidas através de termómetros elétricos de resistência do tipo PT100, dispostos ao longo da espessura da nervura central, bem como numa consola lateral, como representado na mesma Figura 6.

Complementarmente foram instaladas bases para medição da abertura das juntas de dilatação e, em todas as secções de apoio e meio-vão, bases de nivelamento.

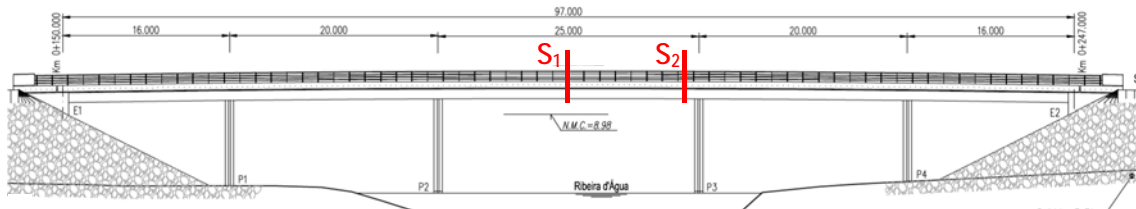


Figura 6. Identificação dos encontros e pilares e localização das duas secções instrumentadas.

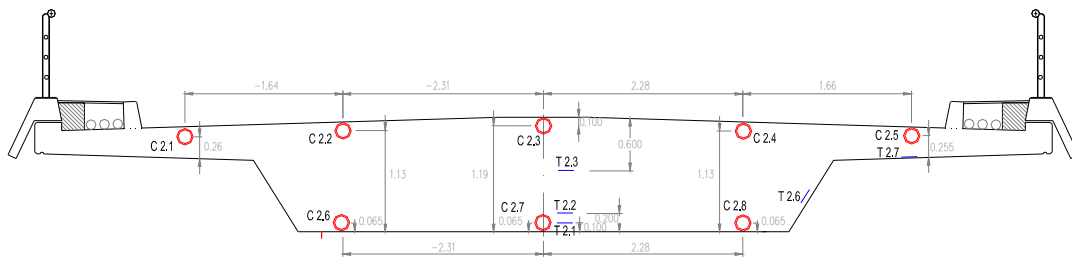


Figura 7. Disposição dos extensómetros e termómetros numa secção instrumentada (S2).

As extensões medidas na secção S2, localizada junto ao apoio no pilar P3, constituem a Figura 8 na qual as deformações positivas são os alongamentos. Os extensómetros colocados próximo da superfície superior da secção apresentam uma evolução semelhante entre si, em que é evidente o efeito da aplicação do pré-esforço e, posteriormente, do comportamento diferido do betão.

A evolução da temperatura ao longo dos meses de janeiro e fevereiro medida no interior do betão pelos termómetros PT100 está representada na Figura 9, juntamente com a temperatura ambiente.

Nestes meses, em que foram registadas as temperaturas médias mais baixas desde a instalação do sistema de monitorização, verifica-se que a amplitude diária da temperatura ambiente foi inferior a 5°C. Nesta figura é ainda possível constatar que as temperaturas medidas no interior do betão pelos sensores colocados próximos da superfície atingem valores muito próximos da temperatura ambiente, enquanto o sensor colocado a meia altura da laje, cuja espessura é de 1,20 m, apresenta variações mínimas ao longo do período em apreço.

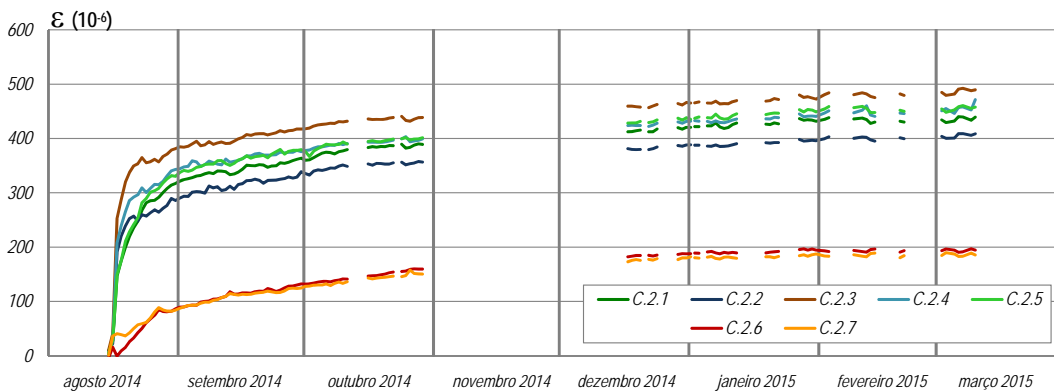


Figura 8. Extensões medidas na secção S2.



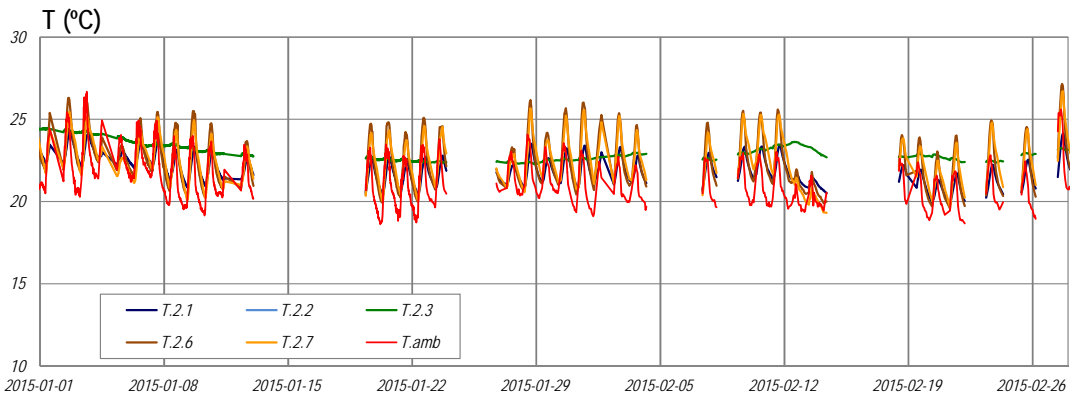


Figura 9. Secção S2: temperaturas no interior do betão medidas em janeiro e fevereiro de 2015

### 3.4 Monitorização da durabilidade do betão

Atendendo à proximidade à orla costeira, a instrumentação para monitorizar a durabilidade do betão destina-se maioritariamente a observar o estado de corrosão das armaduras, o que possibilitará a deteção precoce deste tipo de degradação e, conseqüentemente, acionar medidas mitigadoras. Para esse efeito foram instalados diversos sensores de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), para detetar a despassivação do aço, bem como sensores de medida de corrente galvânica em macro-células ( $I_{gal}$ ) e de resistência elétrica (R), para detetar a penetração de agentes agressivos no betão de recobrimento. Estes sensores foram desenhados e construídos de forma a permitirem que as leituras sejam efetuadas com os sistemas de aquisição de dados utilizados na monitorização do comportamento estrutural. Atendendo às condições de exposição aos ventos marítimos, foram instrumentadas três zonas da secção S2 do tabuleiro, com maior exposição a esses ventos. Em cada zona foi instalado um sensor de  $E_{corr}$ , dois sensores de  $I_{gal}$  e dois sensores de R (Figura 10).



Figura 10. Sensores de R e  $I_{gal}$  instalados no betão de recobrimento na face de jusante da nervura (secção S2).

Nas Figuras 11 a 13 apresentam-se resultados das medições destes parâmetros durante a construção da ponte. A análise destes gráficos evidencia que as armaduras estão no estado passivo e que o betão de recobrimento não está contaminado com

agentes agressivos para o aço, como seria de esperar face ao tempo de vida da estrutura. No período imediatamente após a betonagem mediram-se valores de  $E_{corr}$ ,  $I_{gal}$  e de  $R$  particularmente baixos devido, nos dois primeiros casos, à formação do filme de passivação do aço e, no terceiro caso, à elevada condutividade do betão no estado fresco. De referir o ligeiro aumento que se verifica ainda nestes parâmetros ao longo do tempo, visível a partir do final de agosto de 2014 e que é resultante também da evolução da microestrutura do betão no tempo.

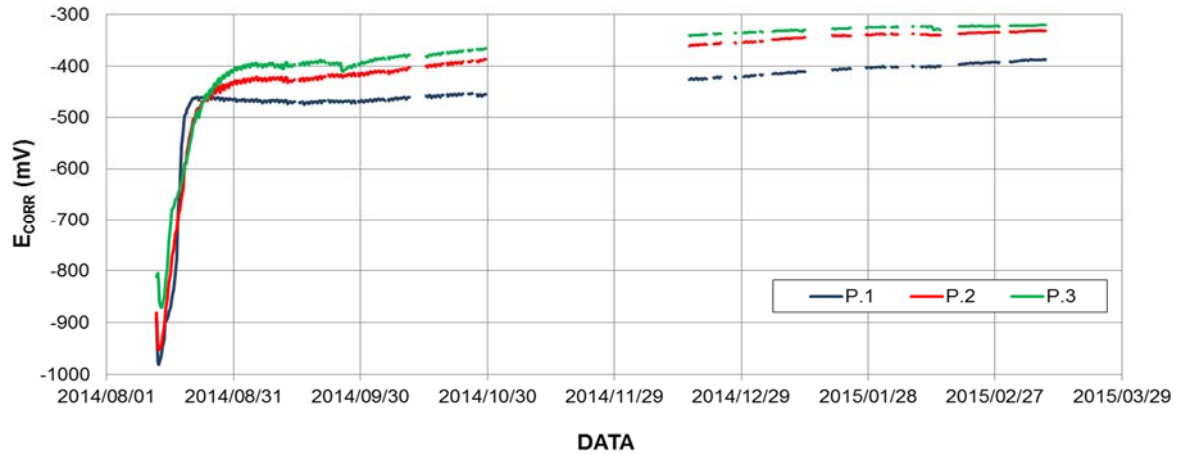


Figura 11. Potencial de corrosão medido nas três zonas da secção S2 do tabuleiro.

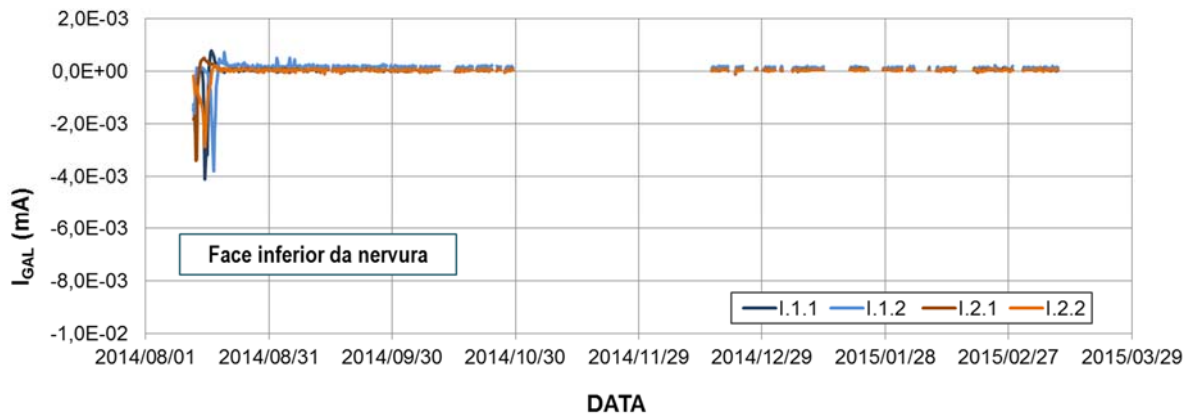


Figura 12. Corrente galvânica medida na face inferior da nervura da secção S2 do tabuleiro.

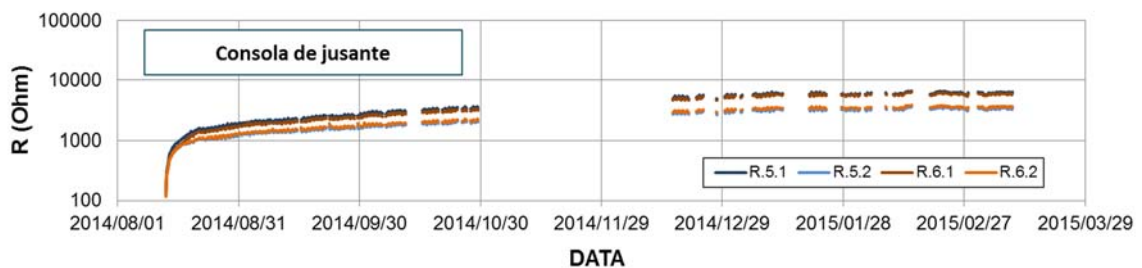


Figura 13. Resistência elétrica do betão medida na consola de jusante da secção S2 do tabuleiro.

### 3.5 O sistema de aquisição e transmissão

A aquisição automática dos sinais provenientes do sensor de temperatura e humidade ambientais, das deformações dos provetes para o estudo do comportamento diferido do betão, as deformações e temperaturas no interior do betão do tabuleiro e ainda dos sensores associados à monitorização para a durabilidade é assegurada por um sistema de aquisição de dados constituído por um *logger Datataker DT 80G* e três módulos expansores de canais CEM 20.

Estes componentes ficaram divididos por duas zonas: no topo do fuste do pilar P3 está instalado um armário estanque que acomoda dois módulos expansores de canais que recebem o sinal dos sensores embebidos no betão; no encontro E1 está o armário principal, com o *logger* e um *router* que assegura o envio da informação recolhida.

## 4 ENSAIOS DE CARGA

No final da construção foram realizados ensaios estáticos visando a verificação do comportamento da estrutura quando solicitada por sobrecargas significativas. Estas sobrecargas foram materializadas por quatro camiões carregados perfazendo uma carga total de cerca de 1200 kN, que foram colocados em 15 posições ao longo do tabuleiro, de forma a maximizar os seguintes efeitos:

- Esforço normal nos pilares, através de 4 casos de carga, com quatro camiões com as traseiras sobre o eixo do pilar (Figura 14a);
- Momento fletor nas secções de meio-vão, com 5 casos de carga com três camiões com os eixos traseiros sobre o meio-vão em causa (Figura 14b);
- Momento fletor nas secções de apoio, através de 4 casos de carga com quatro camiões dispostos duas linhas com os respetivos eixos traseiros sobre o meio-vão de dois tramos consecutivos (Figura 14c);
- Momento torsor no tramo central, com dois carregamentos excêntricos em que foram utilizados dois camiões, dispostos na via de montante, e posteriormente na via de jusante, com as traseiras sobre a secção de meio vão.



Figura 14. Casos de carga

Durante a realização do ensaio foram medidas extensões e temperaturas no interior do betão nas duas secções do tramo central instrumentadas durante a construção, no âmbito do sistema de monitorização, bem como a temperatura ambiente. Foram igualmente medidos os deslocamentos verticais do tabuleiro nas secções de meio vão e de apoio intermédio, bem como as rotações longitudinais e transversais nas diversas secções de apoio, tendo-se instalado, para este efeito defletómetros potenciómetros e clinómetro elétricos do tipo gravidade.

A aquisição dos sinais provenientes dos sensores montados especificamente para o ensaio foi realizada através de um sistema de aquisição independente, constituído por um datalogger *Datataker DT80G* e dois módulos de expansão de canais CEM 20.



A título ilustrativo apresenta-se na Figura 15 a deformada correspondente à posição de carga em que se registou o maior deslocamento vertical do tabuleiro (2,6 mm), medido na secção de meio-vão do tramo principal, quando uma linha de três camiões se encontrava posicionado nesse tramo. De igual modo, na Figura 16 está representada a deformada relativa ao carregamento de dois tramos consecutivos.

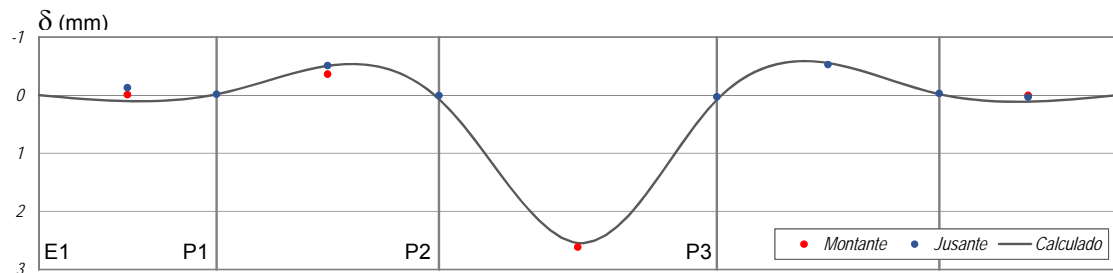


Figura 15. Deformada do tabuleiro durante o carregamento do tramo central (caso de carga 7)

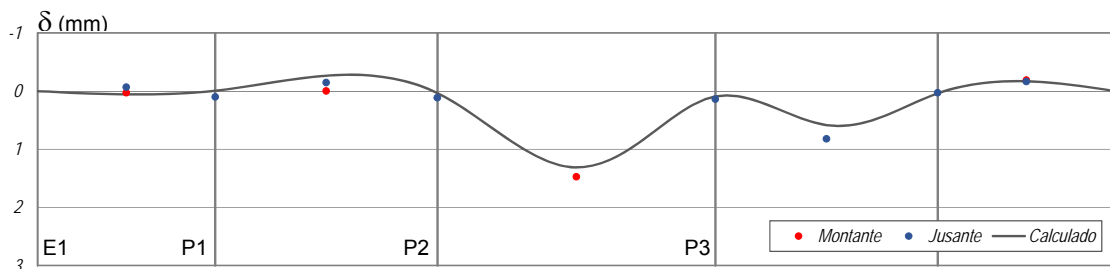


Figura 16. Deformada do tabuleiro durante o carregamento dos tramos P2-P3 e P3-P4 (caso de carga 12)

A Figura 17 é constituída pelas extensões medidas no mesmo caso de carga nas duas secções instrumentadas do tabuleiro, bem como no caso de carga 12, durante o qual foram carregados em simultâneo os tramos compreendidos entre os pilares P2 e P4. Nestas figuras pode verificar-se a menor deformação sistematicamente registada pelos extensómetros instalados nas consolas laterais.

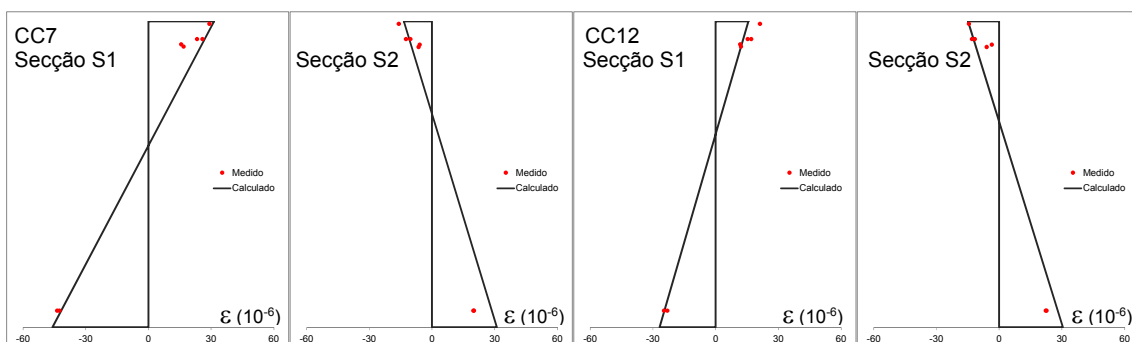


Figura 17. Extensões durante o carregamento do tramo central (caso de carga 7) e dos tramos entre os pilares P2 e P4 (caso de carga 12)

Os valores medidos evidenciam uma forte correlação com os valores estimados pelo modelo estrutural desenvolvido, permitindo verificar que, sob as cargas aplicadas, a estrutura teve um comportamento elástico, com boa recuperação das deformações após a retirada dessas cargas, evidenciando um comportamento linear sob as ações aplicadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Ponte sobre a ribeira D'Água, na ilha da Boa Vista, em Cabo Verde, está dotada de um sistema de monitorização integrado que compreende quatro vertentes: a caracterização das condições meteorológicas, o estudo *in situ* do comportamento diferido do betão, o comportamento estrutural e a durabilidade.

No final da construção, em janeiro de 2015, a ponte foi submetida a ensaios estáticos, durante os quais foi utilizado o equipamento integrado no sistema de monitorização estrutural, complementado com equipamento para esse efeito. Nestes ensaios foi utilizada uma carga de cerca de 1200 kN, materializada por quatro camiões.

O sistema de monitorização apresentado, para além dos benefícios diretamente associados a esta obra, relativos à sua segurança, funcionalidade e durabilidade, permitirá a obtenção de conhecimentos a longo prazo, particularmente interessantes por se tratar de materiais e de uma estrutura executados em condições específicas, nomeadamente ambientais, que poderão ser de grande utilidade na construção ou reabilitação de outras obras de arte em Cabo Verde.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Direção Geral de Infraestruturas (DGI) de Cabo Verde a possibilidade de apresentar esta comunicação.

Um agradecimento pelo apoio recebido para a realização deste trabalho é devido à Armando Rito Engenharia, projetista da obra de arte, à Monte Adriano, construtora da ponte, e à Norvia Cabo Verde, que assegurou a fiscalização.

## 6 REFERÊNCIAS

- Bispo, Susana; Lopes, O.; Cabral, P.; Magriço, D. – “A nova ponte de Ribeira D'Água, em Cabo Verde”, *5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 2014, LNEC, Lisboa
- Chen, Bin; Wang, Xu; Sun, Dezhang; Xie, Xu – “Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-stayed bridge”, *The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 689471, 2014.
- EN 1991-2: *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*, CEN, 2003.
- Inaudi, D.; Cordeau, F.; Figini, A. – “Integrated structural health monitoring systems for short and medium span bridges”, *8<sup>th</sup> International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Niagara Falls, Canada, 2010.
- NP EN 1992-1-1:2010 *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Instituto Português de Qualidade, 2010.
- Santos, L. O.; PEREIRA, Elsa – *Monitorização da integridade estrutural e da durabilidade da Ponte de Ribeira D'Água na ilha da Boa Vista em Cabo Verde*, Plano de instrumentação. Relatório 36/2014, LNEC, 2014.
- Santos, L. O.; Xu, Min – *Ensaios de carga da Ponte de Ribeira D'Água na Ilha da Boa Vista em Cabo Verde*. Relatório 48/2015, LNEC, 2015.