

Viaduto Duarte Pacheco – Inspeção, Reabilitação, e Monitorização das deficiências devidas a reações alcali-sílica

Joaquim Grave dos Santos

Instituto da Mobilidade e dos Transportes, Lisboa, Portugal, joaquim.g.santos@imt-ip.pt

Fernanda Ferreira dos Santos

Infraestruturas de Portugal, S.A., Lisboa, Portugal, fernanda.santos@infraestruturasdeportugal.pt

Tiago Rodrigues

Infraestruturas de Portugal, S.A., Lisboa, Portugal, tiago.rodrigues@infraestruturasdeportugal.pt

RESUMO: Pretende-se nesta comunicação apresentar o historial de inspeções e de intervenções realizadas no Viaduto Duarte Pacheco, tirando-se conclusões no que concerne à evolução das reações expansivas do betão, do tipo álcalis-sílica, verificada após a intervenção de reabilitação geral da obra de arte, que decorreu em 2000-2002. Para esse efeito, procura-se extrair informação dos relatórios das Inspeções Principais entretanto realizadas pela Infraestruturas de Portugal, S.A. e das inspeções visuais efetuadas pelo LNEC, concluindo-se que tanto as reparações das deficiências originadas pelas reações expansivas, como o sistema de proteção do betão estrutural implementado no Viaduto permitiram que a obra apresente hoje um bom estado de conservação, não tendo surgido evidências do aparecimento de novas deficiências devidas a este processo de degradação química do betão estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Viaduto, reações expansivas, degradações, inspeção, reabilitação, monitorização.

1. Introdução

O Viaduto Duarte Pacheco, com 355.10 m de desenvolvimento entre eixos de apoio nos encontros, foi projetado em 1937 pelo Eng. João Alberto Barbosa Carmona e a obra foi executada de abril de 1939 a dezembro de 1944 pela *Sociedade de Empreitada de Obras Públicas, Lda.* (SEOP, Lda.). De referir que o projeto foi verificado pelo Eng. Edgar Cardoso, que exerceu a sua atividade profissional na Junta Autónoma de Estradas entre 1938 e 1951, tendo estado afeto ao Gabinete que coordenou a construção do lanço Lisboa-Estádio Nacional (antiga EN 7), da Autoestrada da Costa do Estoril.

O Viaduto Duarte Pacheco foi objeto de alterações em 1965 tendo o seu perfil transversal sido remodelado. Assim, no sentido Lisboa/Cascais (lado Norte) foi reduzido o passeio de 3,00 m para 1,80 m para introdução de 3 vias nessa faixa. Nessa data, ou em data posterior, foi também removido o separador central inicial e introduzido um perfil tipo *Jersey*.

A partir do início dos anos 90, o estado de deterioração de numerosas componentes da estrutura do Viaduto conduziu a que tivessem sido realizadas inspeções e ensaios de caracterização do betão, que identificaram a presença de agregados reativos e de teores de humidade elevados em quase toda a obra de arte, evidenciando que a degradação desta estrutura se devia à existência de reações expansivas, do tipo álcalis-sílica. A evolução desta situação justificou que entre 2000 e 2002 tivesse sido realizada uma empreitada de reabilitação geral do

Viaduto Duarte Pacheco, que teve como dono de obra o Instituto para a Construção Rodoviária, S.A. (ICOR, S.A.), por projetista a firma A2P CONSULT, Lda., e por empreiteiro geral a Construtora do Tâmega, S.A.

Nos anos subsequentes à intervenção, a Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP, S.A.), entidade atualmente responsável pela conservação deste Viaduto, promoveu a realização de Inspeções Principais em 2008, 2013 e 2019, tendo, no âmbito do protocolo celebrado entre este organismo e o LNEC, a obra sido inspecionada por este Laboratório em 2012/2013. Recentemente, entre 2023 e 2024, a IP, S.A. conduziu trabalhos de reabilitação e de reforço sísmico do Viaduto Duarte Pacheco (Costa & Appleton, 2024).

2. Descrição da estrutura do Viaduto Duarte Pacheco

O Viaduto Duarte Pacheco, com uma largura total de plataforma de 24,00m, e com um comprimento total de 471,0 m, que lhe permitia ser, à época da sua construção, um dos maiores viadutos da Europa, é constituído por cinco sub-estruturas justapostas, integralmente em betão armado, das quais três são em arco, sendo as restantes duas outras porticadas, que se descrevem seguidamente.

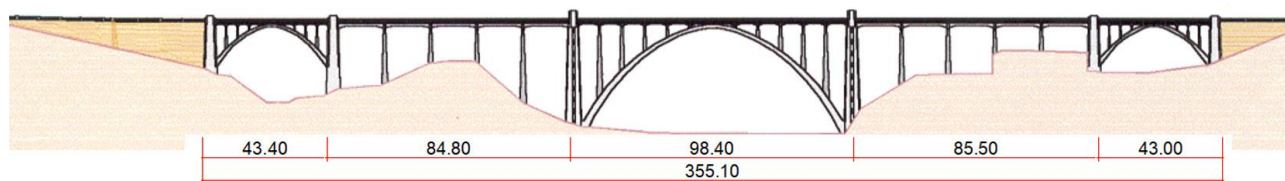


Figura 1 – Alçado do Viaduto Duarte Pacheco

Passagens superiores em arco

As duas passagens superiores em arco que delimitam o viaduto, uma sobre a linha de caminho de ferro e outra sobre a Avenida do Parque Florestal de Monsanto são constituídas, cada uma, por três arcos paralelos com 40 m de vão sobre os quais assenta o tabuleiro de betão armado por meio de pilares encastrados no arco.

A secção transversal do tabuleiro é constituída por uma laje contínua com 9 vãos de 2,30 m e consolas de 1,65 m de vão, apoiada em 10 longarinas com 10 tramos de 4,00 m. As longarinas são contínuas em 5 tramos, entre os apoios extremos e os apoios sobre o fecho do arco.

As longarinas apoiam em pilares ou sobre carlingas encastradas nas cabeças dos pilares. As longarinas têm uma largura de 0,30 m e alturas de 0,65 m no vão e 0,81 m sobre os pilares.

Os apoios extremos das longarinas, nos encontros ou nas pilastras intermédias, são realizados com chapas de chumbo.

Os pilares são articulados, na direção longitudinal, no topo. Os pilares que apoiam nos arcos têm uma largura de 2,683 m e 0,40 m de espessura.

Os arcos, com uma espessura variável de 0,80 m no fecho e 1,50 m nas nascenças e 2,60 m de largura, têm uma forma parabólica e são encastrados nas pilastras. As pilastras são constituídas por betão simples.

Viadutos em viga contínua

Os dois viadutos que dão sequencia às passagens em arco referidas têm uma extensão de 85,80 m entre eixos, são constituídos por vigas contínuas de 5 tramos com 16,35 m de vão assentes em pilares articulados longitudinalmente.

Cada alinhamento de pilares é constituído por 4 montantes ligados por travessas horizontais no topo e a meia altura, constituindo assim pórticos transversais.

A secção transversal do tabuleiro é constituída por uma laje contínua, conforme anteriormente referido para as passagens superiores, apoiada em dez longarinas em viga contínua de 5 tramos de 16,35 m de vão. As longarinas têm 0,50 m de largura e alturas de 1,20 m no vão e 1,90 m sobre os apoios.

Estas longarinas apoiam-se em pórticos transversais, através de articulações metálicas no topo, realizadas em aço vazado (que permitem a rotação associada à flexão longitudinal). Os pórticos transversais são também articulados (na direção longitudinal) ao nível da travessa do primeiro contraventamento, com exceção de um dos pórticos transversais em que esta articulação não existe. Essas articulações são realizadas com chapa de chumbo e núcleo circulares armados e cintados.

Os pilares têm uma secção variável sendo de 0,697 m × 1,022 m no topo. As travessas transversais no topo têm uma secção de 0,65 m × 1,90 m, no vão. As travessas intermédias têm secção de 0,40 m × 0,80 m (ou 2 × 0,40 m x 0,40 m nas articulações).

Os apoios livres das longarinas nas pilastras são realizados por balanceiros metálicos.

Arco central sobre a Avenida de Ceuta

O arco central sobre a Avenida de Ceuta, cuja secção transversal do tabuleiro é semelhante à anteriormente descrita, estando a laje apoiada em 10 longarinas com 12 tramos de 7,83 m, constituindo dois conjuntos de vigas contínuas de 6 tramos entre a pilastra e o fecho do arco.

As longarinas têm uma largura de 0,35 m e altura variável de 0,75 m no vão e 1,20 m sobre os apoios.

O arco central é constituído por 2 arcos gémeos afastados 6,225 m com 91,80 m de corda e 32,70 m de flecha (referidos à linha média) os quais suportam o tabuleiro através de 4 montantes afastados 6,90m, interligados transversalmente por vigas.

Os montantes têm secção variável, sendo de 1,466 m × 1,641 m na ligação ao arco, para o pilar mais alto.

A livre dilatação das longarinas sobre os pilares é assegurada por placas metálicas de escorregamento nos encontros e no eixo do arco. O apoio das longarinas nos pilares é feito através de articulações (longitudinais) metálicas. O apoio das longarinas nas pilastras é feito através de aparelhos metálicos de roletes.

Os arcos têm a forma de uma parábola de 5º grau. A espessura no fecho é de 1,40 m e nas nascenças de 2,80 m, onde estão encastrados nas bases das pilastras principais.

As pilastras principais têm uma altura de 43,00 m, suportando os apoios extremos das vigas do tabuleiro dos viadutos e do tabuleiro do arco central. As pilastras são vazadas contando oito pavimentos de betão armado com um vão livre de 2,50 m, os quais constituem também um travamento das paredes das pilastras. As paredes das pilastras são ligeiramente armadas. Os pavimentos estão interligados por escadas de madeira.

O acesso às pilastras realiza-se quer ao nível do tabuleiro quer ao nível da nascença dos arcos, onde existe também uma abertura para acesso à face superior dos arcos.

A secção transversal das pilastras apresenta uma largura de ~ 29,00 m e um desenvolvimento na direção longitudinal do Viaduto de 3,80 m no topo e de 6,12 m na base. Nas faces laterais das pilastras existem frestas de iluminação natural do interior.

As fundações do viaduto foram realizadas através de pegões ou sapatas diretas, tendo sido de difícil execução, pois o Vale de Alcântara inclui formações calcárias e margo-calcárias cortadas por várias falhas.

3. Inspeções e ensaios realizados entre 1993 e 2001

Em 1993 e 1994 o LNEC realizou uma inspeção visual e um conjunto de ensaios para caracterizar o estado de deterioração do Viaduto Duarte Pacheco.

Na inspeção visual verificou-se a ocorrência de fendilhação em vários elementos da estrutura. Essa fendilhação apresentava-se quer orientada ao longo das armaduras longitudinais, quer sem orientação preferencial definida (tipo "craquelé").



Figura 2 – Fissuração devida a reações álcalis-sílica nas longarinas do tabuleiro do Viaduto Duarte Pacheco

Da análise efetuada em microscópio eletrónico e de microanálise dos raios X realizada em amostras de betão concluiu-se existirem reações expansivas no betão. Estas observações revelaram compostos típicos de reações álcalis-sílica e etringite, o que permitiu identificar a principal causa de degradação do betão estrutural da obra de arte.

Em 2001 foi solicitada à firma projetista A2P CONSULT, Lda., no âmbito da realização do projeto de reabilitação geral do Viaduto, uma inspeção complementar, que teve como objetivos atualizar a avaliação da deterioração existente na obra de arte, e avaliar se o problema das reações de origem interna era geral ou se estava circunscrito às áreas já detetadas no arco central.

No que se refere ao problema em análise importa referir que a fendilhação que se verificava nos pilares e arcos tinha em algumas zonas aberturas significativas e grandes profundidades. Para além da fendilhação de geometria irregular observava-se nos pilares e arcos fendilhação orientada segundo o eixo longitudinal. Nos arcos a fendilhação ocorria com maior incidência nas faces superiores e laterais. Nas faces superiores essas fendas atingiam vários milímetros. Essa fendilhação produzia a despassivação das armaduras e originava a sua corrosão e subsequente delaminação do betão. O maior nível de fendilhação observado nos arcos centrais e nos pilares sobre estes arcos estava associado à maior espessura destes elementos, às condições de exposição da obra nesta zona, e à eventual maior concentração de inertes reativos nestes elementos estruturais.

Os ensaios de composição do betão realizados no âmbito desta inspeção complementar indicaram que existem inertes reativos em toda a obra. Os ensaios de humidade mostravam que a humidade relativa no interior dos elementos estruturais é superior a 85%. Os ensaios de reatividade potencial dos álcalis permitiram, todavia, concluir que estas reações estavam já praticamente terminadas.

4. Trabalhos associados à reparação das degradações devidas às reações expansivas integrados na empreitada de reabilitação geral do Viaduto

Entre 2000 e 2002 realizou-se a empreitada de reabilitação geral do Viaduto Duarte Pacheco, que teve por base o projeto desenvolvido pela firma A2P CONSULT (Prof. Júlio Appleton, Prof. António Costa e Engº José Delgado).

No que concerne à reparação das degradações associadas às reações expansivas, foram consideradas as seguintes intervenções:

- a) Reparação local das zonas com indícios de corrosão de armaduras, reconstruindo o betão da camada superficial com microbetão ou argamassas pré-doseadas. Em zonas com extensão significativa foi previsto o reforço com malha de aço galvanizado que tinha o objetivo de controlar, reduzindo, a abertura de fendas devidas a novas reações expansivas.
- b) Reparação das zonas com fendilhação acentuada (em particular em pilares e arcos) provocada pelas reações expansivas, com ou sem corrosão de armaduras. Nas fendas de abertura superior a 1,0 mm foi realizado o seu preenchimento com calda de cimento e a selagem do bordo com poliuretano. As fendas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm foram somente seladas.



Figura 3 – Fendilhação em pilar e reparação mediante injeção

- c) A laje consola que se prolonga para o exterior das longarinas extremas tinha apenas uma espessura de 0,07 m o que dificultava a sua reparação. Assim foi considerado que a sua substituição seria mais apropriada, tendo sido demolidas as lajes originais. A espessura da nova laje, betonada *in situ*, foi de 0,10 m.



Figura 4 – Substituição das lajes em consola dos passeios

Todos estes trabalhos de reparação foram complementados através da proteção da estrutura em relação ao mecanismo de corrosão de armaduras e mediante o controlo das reações expansivas álcalis-sílica. Neste efeito de proteção é essencial a eficácia no controlo das trocas de humidade entre o ambiente exterior e a estrutura de betão. Assim, procurou-se implementar um sistema de proteção que deveria eliminar a penetração de água para o interior do betão ao mesmo tempo que possibilitava a saída de vapor de água do interior do betão para o meio exterior. Paralelamente o sistema de proteção superficial deveria ainda garantir uma adequada proteção em relação à penetração de anidrido carbónico (CO₂) e deveria possuir capacidade de deformação para

absorver, sem fendilhar, as deformações expansivas (e abertura de fendas) devidas às reações álcalis-sílica. Assim este sistema de proteção superficial multi-barreiras implementado no Viaduto é composto pelos seguintes elementos:

- Impregnação hidrofugante, sistema aplicado por projeção e que penetrou na estrutura porosa superficial do betão, revestindo os poros e repelindo a água.
- Barramento das fendas, incorporando malha de fibras de vidro.
- Pintura (revestimento espesso e flexível) aplicado pelo menos em duas demãos cruzadas e com maior espessura nos seguintes elementos: arcos centrais, pilares sobre os arcos centrais, pilastras dos arcos centrais e vigas exteriores do tabuleiro (espessura superior ou igual a 500 µm).



Figura 5 – Viaduto após a aplicação do sistema de proteção

Para além destes trabalhos foram ainda beneficiados ou substituídos os aparelhos de apoio metálicos, reforçadas as longarinas externas através da colagem de laminados de carbono, e reconstruídos os topos das pilastras e zonas de apoio das vigas, que se encontravam severamente danificados. Foi refeito o sistema de drenagem das águas pluviais, e repavimentado o tabuleiro, envolvendo esta intervenção a aplicação de um sistema de impermeabilização do mesmo. Foram igualmente realizados outros trabalhos de beneficiação geral da obra de arte.

5. Observação da Obra de Arte posteriormente à conclusão dos trabalhos de reabilitação geral

Desde a conclusão da empreitada de Reabilitação Geral, a obra de arte tem vindo a ser inspecionada, no âmbito do Sistema de Gestão da Conservação de Obras de Arte da Infraestruturas de Portugal, SA (SGOA). Em 2008 e 2013 foram realizadas Inspeções Principais que classificaram o Viaduto com o Estado de Conservação 2 (EC 2), não tendo sido identificadas mais deficiências associadas a reações expansivas.

Em 2012/2013, no âmbito de protocolo estabelecido entre a IP, SA e o LNEC, a obra de arte foi inspecionada visualmente por este Laboratório. Na inspeção realizada procurou-se seguir o prescrito nas *Especificações Técnicas para Inspeções Principais* (Estradas de Portugal, S.A., 2010), documento integrado no SGOA. A referida inspeção teve lugar em dezembro de 2012 e em janeiro de 2013, tendo concluído que o Viaduto se encontrava num bom estado de conservação, assinalando, todavia, o aparecimento de fendas pontuais, de delaminação de betão em zonas localizadas, e de corrosão dos aparelhos de apoio, sendo todas estas deficiências associadas à falta de estanquicidade das juntas de dilatação do tabuleiro.

Em 2019 foi realizada nova Inspeção Principal, que atualizou o Estado de Conservação do Viaduto para EC3. Com base nas conclusões da mesma foram integrados alguns trabalhos de reabilitação geral na empreitada destinada a reforçar o comportamento sísmico da obra de arte, resultando, todavia, evidente de todos os trabalhos de inspeção desenvolvidos, que após a realização da empreitada de reabilitação geral concluída em

2002, não apareceram, com expressão significativa, novas deficiências que possam ser associadas a reações expansivas. Nesse sentido, não foram realizados mais ensaios de caracterização do betão estrutural subsequentemente aos realizados no âmbito da inspeção realizada pela A2P CONSULT em 2001.

6. Empreitada de Reforço Sísmico

Entre 2023 e 2024, a IP, SA promoveu a realização de uma empreitada de reabilitação e de reforço sísmico do Viaduto Duarte Pacheco, que introduziu alterações substanciais no funcionamento estrutural do Viaduto, no que concerne às ações horizontais. A mesma teve igualmente como projetista a firma A2P CONSULT (Costa & Appleton, 2024).

A solução consistiu na ligação das estruturas dos pórticos e do arco central às pilastras, eliminando as 5 juntas de dilatação existentes neste troço do viaduto. Com esta alteração do sistema estrutural materializa-se um pórtico de grandes dimensões, que constituirá a estrutura primária na resistência aos sismos. O modelo adotado permitiu otimizar a intervenção, pois minimiza os trabalhos de reforço nas várias estruturas do Viaduto, concentrando-os essencialmente em dois elementos estruturais, as pilastras.

A intervenção incluiu o reforço destas peças, a abertura de duas juntas sísmicas na junção do tabuleiro dos pórticos às pilastras dos arcos laterais, e na substituição dos aparelhos de apoio do tabuleiro nestes elementos verticais.

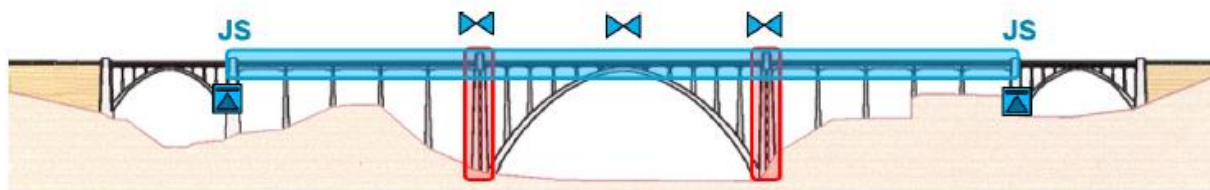


Figura 5 – Pórtico que constitui a estrutura primária de resistência aos sismos

Para além dos trabalhos associados ao reforço sísmico, a empreitada ainda englobou a reparação das deficiências identificadas nas inspeções realizadas, nomeadamente a reparação de alguns dos apoios das longarinas do tabuleiro do pórtico do lado de Cascais, que se tratava de peças que se encontravam severamente danificadas aquando da primeira empreitada de reabilitação realizada, e que voltaram a apresentar algum destacamento de betão. Para além desta situação localizada, não se verificou a necessidade de proceder a reparações de outros danos que se possa admitir terem tido origem em novas reações expansivas.

7. Conclusões

O Viaduto Duarte Pacheco constituiu o primeiro exemplo de uma obra de arte em Portugal, que apresentava degradação generalizada das suas componentes estruturais devida a reações expansivas, que foi objeto de uma intervenção de grande reparação. Passados mais de 20 anos desde que foi executada esta reabilitação, o conjunto de inspeções e de trabalhos realizados permite concluir não só que a solução de reparação das deficiências adotada se revelou eficaz, como o sistema de proteção das superfícies de betão implementado tem permitido a manutenção das componentes estruturais do Viaduto num estado de conservação adequado.

Face a todo este historial, é consistente pensar-se que o potencial reativo se encontra esgotado nesta obra de arte, situação esta que poderá vir ainda a ser mais confirmada em futuros ensaios de caracterização que venham a ser realizados. Localizando-se o Viaduto Duarte Pacheco perto do Rio Tejo, e numa zona de intenso tráfego rodoviário, sujeito pois a um ambiente muito agressivo, outros fatores poderão vir a ser determinantes no futuro na degradação do betão estrutural desta obra de arte, que ganhou vida residual com as intervenções realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A2P, Lda - *Inspeção Complementar e Actualização do Projecto de Reabilitação Estrutural*, julho 2001

Appleton, J. - *Caso de Estudo - Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa*" Curso *Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna*, LNEC - LCPC, dezembro 2001

Carmona, João Alberto Barbosa - *Projecto do Viaduto Duarte Pacheco*, 1966

Costa, A.; Appleton, J. – “Reforço sísmico do viaduto Duarte Pacheco”, Encontro Nacional Betão Estrutural 2024, novembro de 2024.

Gaspar, Manuel A. Duarte - *Projecto de Reabilitação e Beneficiação Geral do Viaduto Duarte Pacheco*, Lisboa, julho de 1997

IP,S.A. – *Relatórios de Inspeção Principal*, 2008, 2013, 2019

LNEC - Viaduto Duarte Pacheco - Diversos Estudos, Inspeção e Ensaios - Rel. 123/94 NAB, Rel. 65/96 NQ, NT 61/01 DMC, Rel. 252/02 – NQ, Rel. 234/2013 – DE/NOE