

Reforço Sísmico do Viaduto Duarte Pacheco

A. Costa¹

J. Appleton²

RESUMO

O Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa, com 355 m de desenvolvimento entre eixos dos encontros, foi construído entre 1937 e 1944, sendo a sua estrutura integralmente realizada em betão armado. O viaduto foi reabilitado em 2005 com o objetivo de reparar e proteger a estrutura face às anomalias existentes induzidas por reações expansivas no betão. Em 2022/24 foi realizada uma intervenção de reforço sísmico da estrutura.

A avaliação do comportamento sísmico do viaduto veio revelar deficiências relevantes que colocaram diversos desafios para a sua resolução. O viaduto é constituído por 5 estruturas independentes com muitas juntas de dilatação. Estas estruturas apresentam um comportamento dinâmico independente pelo que os deslocamentos induzidos pelos sismos originam o impacto entre os tabuleiros na zona das juntas.

A estrutura sobre o arco central e os viadutos de ligação entre arcos apresentam um comportamento sísmico inadequado na direção longitudinal devido à sua muito baixa rigidez e insuficiente capacidade de restituição lateral. Esta situação pode causar um movimento descontrolado destas estruturas com consequências imprevisíveis.

A análise das possíveis soluções de intervenção para resolver as principais deficiências relativas às juntas de dilatação, ao comportamento da estrutura sobre o arco central e ao comportamento dos viadutos conduziu a uma estratégia de intervenção que consiste na redução dos deslocamentos sísmicos.

A intervenção consiste no reforço das pilastras do arco central, na ligação dos viadutos e estrutura sobre o arco central às pilastras e na abertura de duas juntas sísmicas na junção do tabuleiro dos viadutos às pilastras dos arcos laterais. Com esta intervenção materializa-se um grande pórtico que constituirá a estrutura primária na resistência aos sismos.

Palavras-chave: Estruturas de betão; Viadutos; Sismos; Avaliação; Reforço.

1. INTRODUÇÃO

A experiência na avaliação de obras existentes mostra que parte significativa das estruturas apresentam deficiências relativamente ao seu desempenho sísmico, seja porque não foram dimensionadas para esta ação, seja porque as disposições regulamentares da época do seu projeto eram insuficientes.

O dimensionamento sísmico começou a ser introduzido na década de 1960 através de metodologias muito simples e sem requisitos relativos à ductilidade. Na década de 1980 houve uma evolução muito

¹ A2P, Lisboa, Portugal. antonio.costa@a2p.pt

² A2P, Lisboa, Portugal. julio.appleton@a2p.pt

relevante do dimensionamento traduzida na regulamentação de 1983, mas, ainda assim, com disposições que hoje se consideram insuficientes.

As principais deficiências que se observam nestas estruturas podem ser resumidas da seguinte forma: sistemas estruturais menos adequados à resistência da estrutura aos sismos; ausência de juntas sísmicas; fundações com baixa capacidade para a ação sísmica; deficiente capacidade resistente ao esforço transverso dos elementos estruturais; ausência ou insuficiente confinamento do betão nas zonas críticas; espaçamento entre cintas e estribos que comprometem o comportamento das zonas críticas devido à encurvadura dos varões longitudinais.

Nas pontes acrescem ainda os seguintes problemas: elevado número de juntas de dilatação com capacidade insuficiente para acomodar os movimentos sísmicos; ligações rígidas do tabuleiro aos encontros; tramos intermédios simplesmente apoiados em consolas (tramos Gerber); aparelhos de apoio com capacidade insuficiente, quer para os deslocamentos, quer para as forças sísmicas.

A intervenção de reforço nestas estruturas para as dotar de um bom desempenho sísmico apresenta, frequentemente, dificuldades difíceis de ultrapassar. Por vezes não será viável dotá-las da capacidade que consideramos adequada sendo, todavia, necessário melhorar o seu desempenho para níveis aceitáveis.

No reforço sísmico de estruturas existentes é importante seguir-se um conjunto de princípios de forma a auxiliar a definição da intervenção a realizar. Esses princípios podem ser colocados da seguinte forma sequencial:

- Definir os requisitos de desempenho para a estrutura (exigências de comportamento sísmico) considerando a sua importância e os aspetos económicos;
- Definir a estratégia de intervenção mais eficaz para atingir os requisitos de desempenho estabelecidos;
- Definir as metodologias de intervenção adequadas para a implementação da estratégia escolhida;
- Dimensionar e pormenorizar as soluções selecionadas considerando os modelos de comportamento apropriados a cada tipo de reforço.

Para a intervenção de reforço sísmico colocam-se essencialmente duas estratégias: redução das exigências sísmicas ou aumento da capacidade de deformação da estrutura existente como ilustrado na Fig. 1 para o caso genérico de uma ponte sujeita a um deslocamento δ imposto pela ação sísmica.

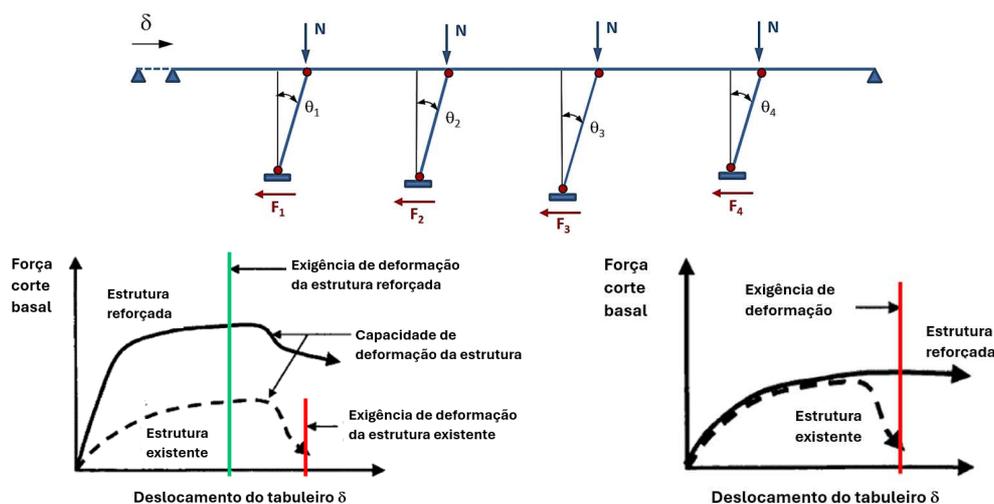
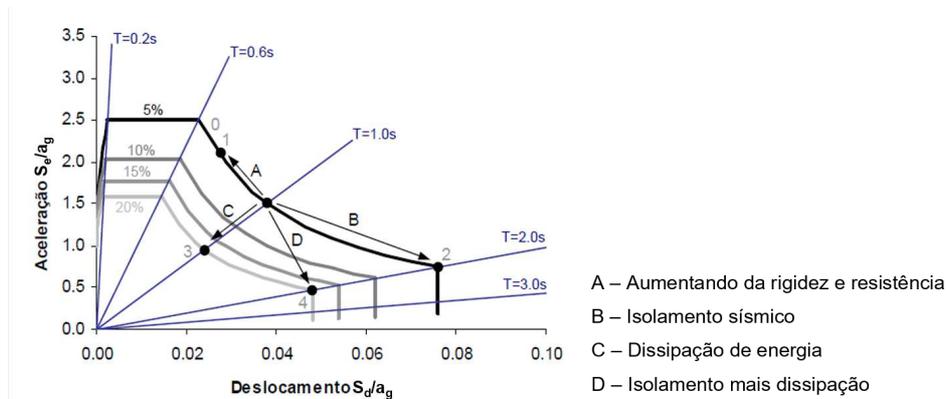


Figura 1. Estratégias de intervenção: redução da exigência e aumento da capacidade.

A redução das exigências sísmicas constitui uma estratégia bastante atrativa e eficaz pois, em geral, minimiza a intervenção na estrutura. Para implementar esta estratégia é possível adotar diferentes metodologias conforme ilustrado na Fig. 2 recorrendo a um diagrama de espectro de resposta de aceleração e deslocamento.



O isolamento de base, o aumento do amortecimento ou a combinação destas duas metodologias apresentam grande eficácia no controlo do comportamento sísmico.

2. DESCRIÇÃO DO VIADUTO

O Viaduto Duarte Pacheco, com 355 m de desenvolvimento entre eixos dos encontros, foi construído entre 1937 e 1944. A Fig. 3 ilustra o viaduto em causa.

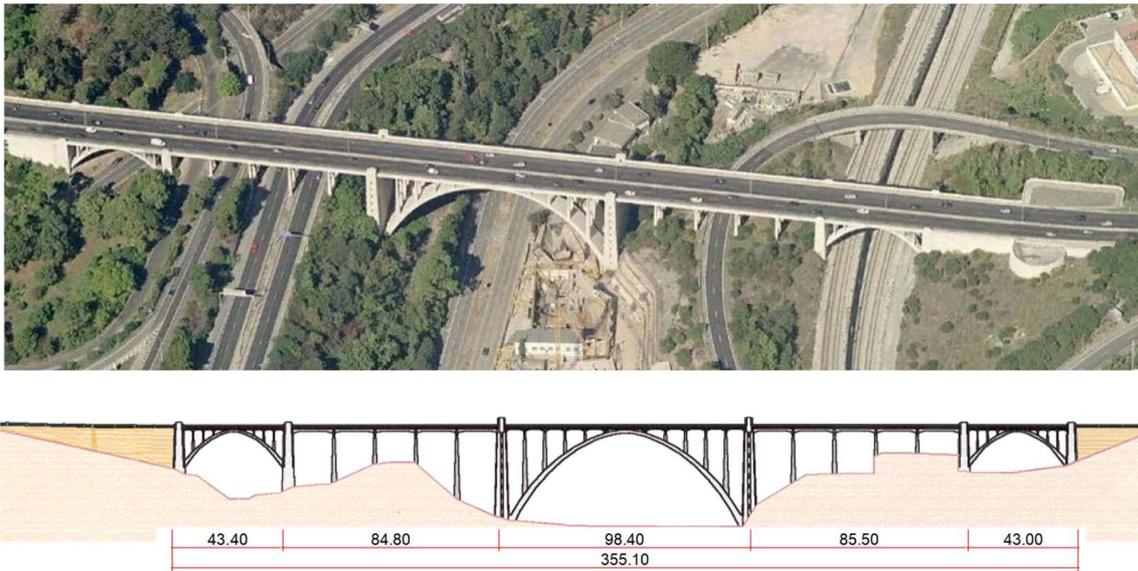


Figura 3 – Vista do lado sul e alçado do lado norte do viaduto.

O viaduto, integralmente realizado em betão armado, divide-se em 5 estruturas:

- Duas passagens superiores em arco, uma sobre a linha de caminho de ferro e outra sobre a Avenida do Parque Florestal de Monsanto. Cada uma destas passagens compõe-se de três arcos paralelos com 43m de vão que descarregam em duas pilastras.
- Um arco central sobre a Avenida de Ceuta com 98,4m de vão que se apoia em duas grandes pilastras.

- Dois viadutos de ligação entre as estruturas em arco com uma extensão de cerca de 85m entre eixos de apoio nas pilastras e 5 tramos com 16,35 m de vão apoiados em 4 alinhamentos de pilares, 3 dos quais articulados longitudinalmente.

Todas as estruturas estão separadas por juntas de dilatação de cada lado das 4 pilastras, existindo ainda uma junta de dilatação no tabuleiro a meio vão do arco central. Contando com os encontros a obra apresenta 11 juntas de dilatação, Fig. 4.

A secção transversal do tabuleiro, com largura de 24m, é constituída por uma laje apoiada em 10 longarinas com vãos diferentes em cada uma das estruturas acima referidas. Os 4 pilares de cada alinhamento de apoio do tabuleiro nos viadutos e no arco central formam pórticos na direção transversal, Fig. 5.

A obra não foi dimensionada para resistir aos efeitos da ação sísmica por não existir na época regulamentação neste domínio.

O viaduto foi reabilitado em 2005 para reparar os danos originados por reações expansivas álcalis-sílica e foi recentemente intervencionado com o objetivo de melhorar o seu desempenho sísmico.

3. AVALIAÇÃO SÍSMICA

A avaliação do comportamento sísmico do viaduto veio a revelar deficiências relevantes, que a seguir se descrevem, colocando diversos desafios para a sua resolução.

- Viaduto constituído por 5 estruturas independentes com muitas juntas de dilatação. Estas estruturas apresentam um comportamento dinâmico diferente pelo que os deslocamentos induzidos pelos sismos originam o impacto entre os tabuleiros na zona das juntas.

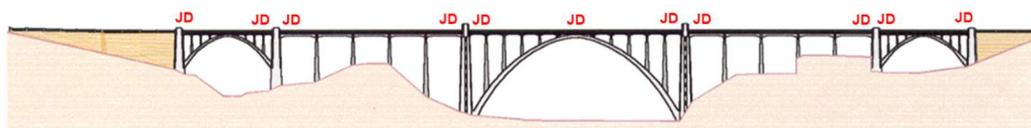


Figura 4. Alçado do viaduto. Localização das juntas de dilatação.

- Os viadutos intermédios são muito flexíveis na direção longitudinal e apresentam deficiências relevantes relativamente ao comportamento sísmico nesta direção.

Nestes viadutos o tabuleiro está apoiado nas pilastras em aparelhos móveis com balanceiros, em 3 alinhamentos de pilares articulados e em apenas um alinhamento de pilares que restringe o movimento longitudinal do tabuleiro, Fig. 5.

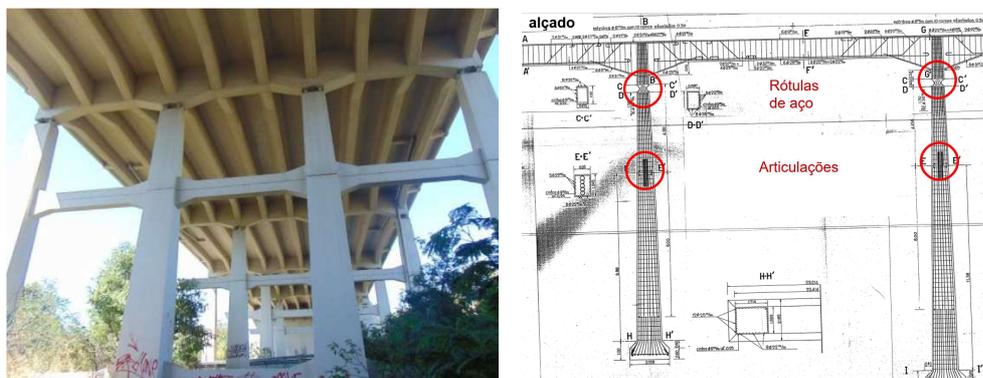


Figura 5. Vista dos pilares do viaduto com articulações ao nível da travessa marcadas por uma junta e extrato do desenho de projeto mostrando as articulações em causa.

A rigidez da estrutura na direção longitudinal é muito reduzida, apresentando o modo de vibração nesta direção um período da ordem de 6s. Importa referir que este tipo de soluções era relativamente frequente em obras das décadas de 1940 a 1960 pois existia na altura grande preocupação com os efeitos das deformações impostas e com os assentamentos diferenciais dos apoios.

O comportamento da estrutura configura uma situação muito desfavorável para a obra que poderá ser explicada recorrendo à Fig. 6.

Sob a ação das deformações induzidas pelo sismo geram-se forças horizontais nas articulações dos pilares que tendem a amplificar os deslocamentos nestes elementos e no tabuleiro, o que é muito desfavorável por conduzir a elevados efeitos P- Δ com consequências imprevisíveis para a estrutura. Por outro lado, a capacidade de restituição lateral é feita à custa de um único alinhamento de pilares sendo manifestamente insuficiente. Esta situação pode originar a acumulação de deslocamentos apenas num sentido e o agravamento sucessivo dos efeitos P- Δ .

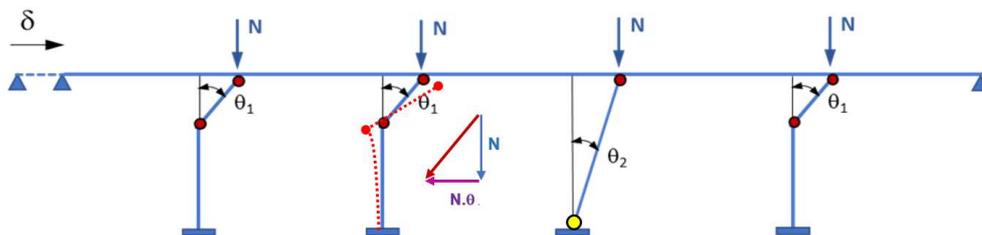


Figura 6. Comportamento dos viadutos entre os arcos.

Os aparelhos de apoio com balancetes têm funcionamento idêntico a pêndulos. Nestes aparelhos geram-se forças horizontais que poderão atingir grande magnitude para deslocamentos relativamente elevados induzidos pelos sismos.

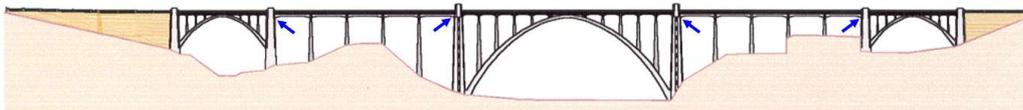


Figura 7. Comportamento dos aparelhos de apoio do tabuleiro nas pilastras.

- A estrutura do arco central apresenta um comportamento sísmico inadequado na direção longitudinal com deficiências ao nível dos montantes (6 alinhamentos de pilares). Um aspeto com importância relevante refere-se à pormenorização das armaduras da base na sua ligação ao arco, Fig. 8. O reduzido comprimento de amarração destas armaduras causa grande incerteza quanto ao comportamento dos pilares, podendo estes, no limite, funcionar como pêndulos. Esta situação causa um movimento descontrolado da estrutura apoiada nos arcos. Na direção transversal os pilares estão ligados na base por uma travessa sobre o arco que garante uma boa amarração da armadura longitudinal, Fig. 9.

Reforço Sísmico do Viaduto Duarte Pacheco

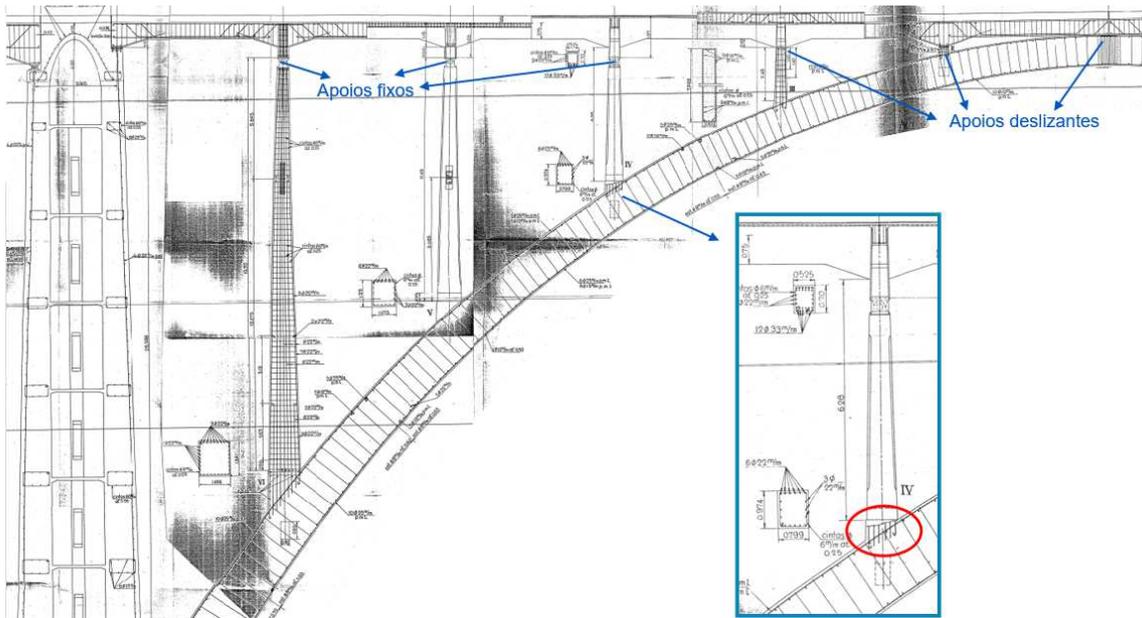


Figura 8. Estrutura do arco central mostrando a amarração insuficiente da armadura de pilares.



Figura 9. Travessa de ligação da base dos pilares na direção transversal.

Nos arcos laterais o tabuleiro está apoiado em 3 alinhamentos de pilares-parede que descarregam em três costelas em arco, Fig. 10. Nestas estruturas não se detetaram deficiências relevantes com exceção da resistência ao esforço transversal de alguns pilares-parede de apoio do tabuleiro.



Figura 10. Estrutura dos arcos laterais.

4. REFORÇO SÍSMICO

A análise das possíveis soluções de intervenção para resolver as principais deficiências relativas às juntas de dilatação, ao comportamento da estrutura sobre o arco central e ao comportamento dos viadutos conduziu a uma estratégia de intervenção que consiste na redução dos deslocamentos, sendo adotada metodologia de intervenção do tipo A apresentada anteriormente.

Considerando que as pilastras do arco central são elementos de grande dimensão com secção na base da ordem de 30 x 6 (m), a solução seleccionada foi explorar estes elementos para o controlo dos deslocamentos dos viadutos intermédios e da estrutura do arco central. A solução consistiu na ligação das estruturas dos viadutos e do arco central às pilastras, eliminando as 5 juntas de dilatação existentes neste troço do viaduto.

Com esta solução materializa-se um pórtico de grandes dimensões que constituirá a estrutura primária na resistência aos sismos como ilustrado na Fig. 11. A solução permitiu otimizar a intervenção pois minimiza os trabalhos de reforço nas várias estruturas do viaduto concentrando-os essencialmente em dois elementos estruturais. Trata-se da implementação do conceito de reforço seletivo.

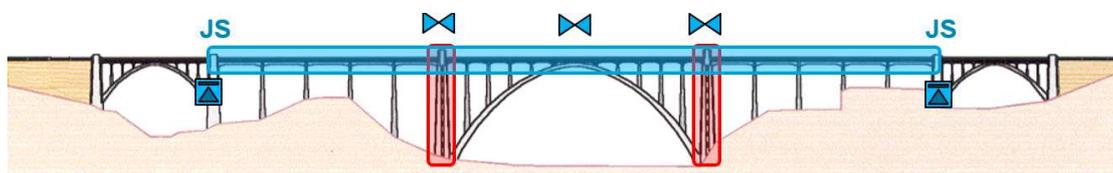


Figura 11. Pórtico que constitui a estrutura primária na resistência aos sismos.

A intervenção consiste no reforço das pilastras, na abertura de duas juntas sísmicas na junção do tabuleiro dos viadutos às pilastras dos arcos laterais e na substituição dos aparelhos de apoio do tabuleiro nestas pilastras. Para dimensionamento das soluções foi considerada a ação sísmica com período de retorno de 475 anos.

O principal desafio da metodologia implementada foi o reforço das pilastras do arco central. Estes elementos eram fracamente armados, com varões apenas no contorno exterior da secção, não dispondo da armadura mínima de flexão, Fig. 12. Deste modo, a sua capacidade de deformação estava comprometida para os deslocamentos induzidos pelo sismo da nova solução estrutural pois nesta situação gera-se apenas uma fenda na base da pilastra concentrando-se aí toda a deformação.

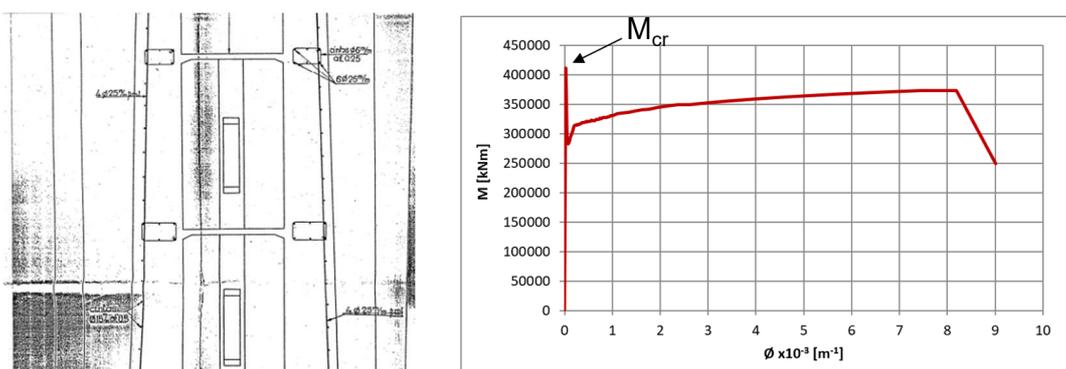


Figura 12. Comportamento da secção da base das pilastras.

Foi, assim, necessário reforçar as armaduras longitudinais para um nível superior à armadura mínima de modo que seja possível desenvolver-se na base uma fendilhação distribuída que dotará o elemento da necessária capacidade de deformação. Este reforço foi realizado no interior da pilastra, Fig. 15.

Por outro lado, a ligação entre as duas paredes das pilastras materializava-se apenas por lintéis localizados nas suas faces laterais entre as aberturas das janelas, Fig. 13.

Nestes elementos geram-se esforço de corte com valor muito superior à sua capacidade resistente pelo que a ligação entre as paredes seria destruída para níveis reduzidos da ação sísmica.

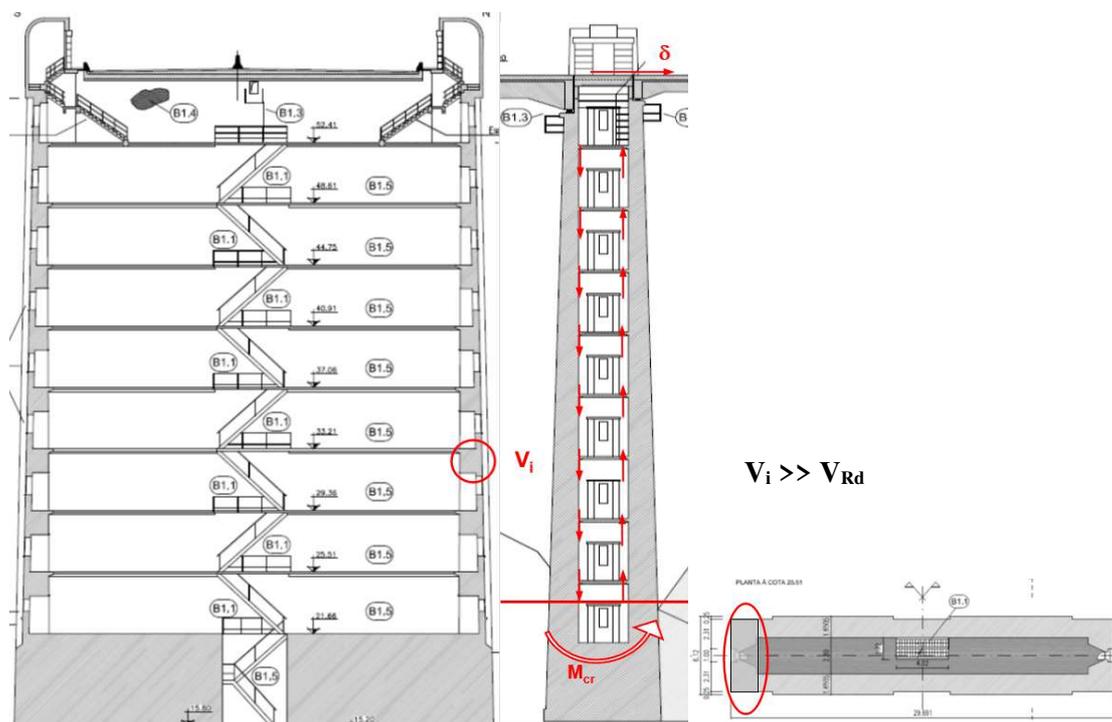


Figura 13. Ligação entre as paredes das pilstras com lintéis localizados nas faces laterais.

O reforço da ligação entre as paredes das pilstras foi realizado reforçando os lintéis existentes com varões de pré-esforço embebidos em furos executados por carotagem do betão (8 varões/lintel dispostos em cruz com funcionamento idêntico à armadura de lintéis de ligação de paredes acopladas). Para além deste reforço foi necessário ainda introduzir no interior duas paredes-diafragma de elevada capacidade e devidamente ligadas às paredes existentes das pilstras, Fig. 14.

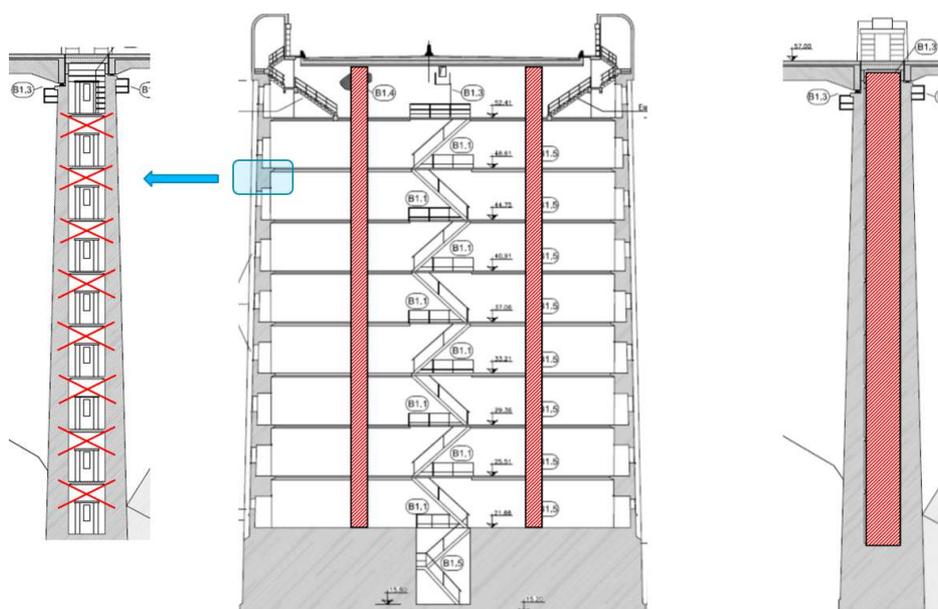


Figura 14. Reforço da ligação entre as paredes das pilstras – lintéis e paredes-diafragma.

Estas paredes apresentam aberturas de vão de porta ao nível dos vários pisos das pilstras para garantir a acessibilidade a toda a área de cada piso. Nas Figs 15 e 16 estão representados os vários tipos de reforços implementados.

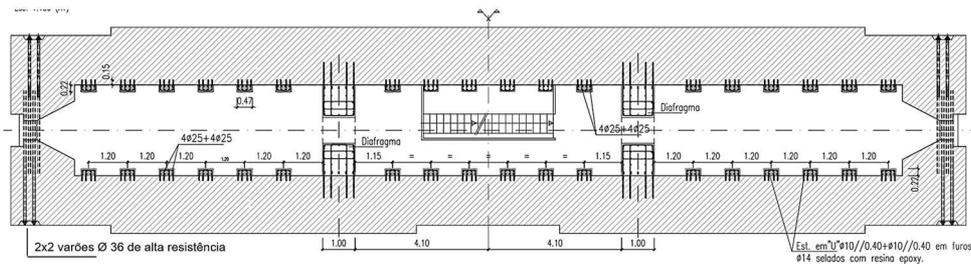


Figura 15. Reforço das pilastras com nervuras armadas, reforço de lintéis e paredes-diafragma.

As elevadas forças mobilizadas nas armaduras de reforço na base das pilastras foram transmitidas à fundação por meio de varões de pré-esforço devidamente amarrados ao maciço de fundação, Fig. 16.

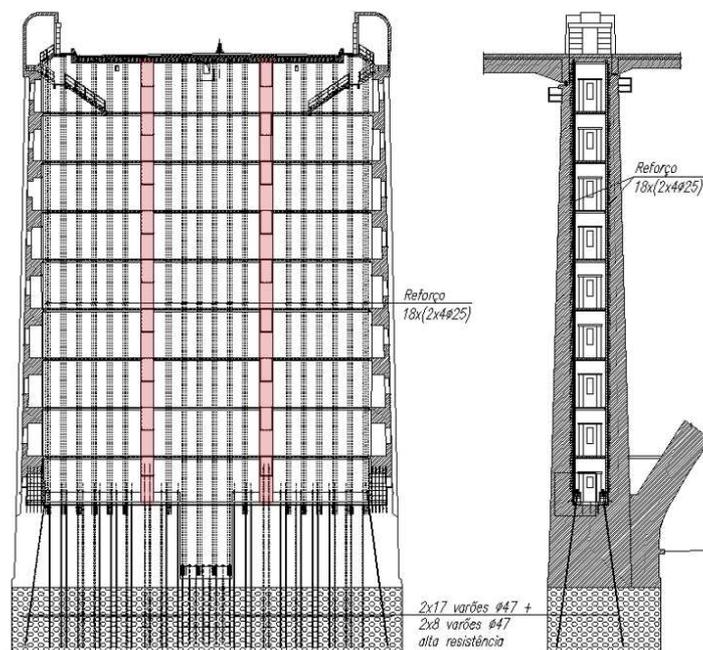


Figura 16. Corte longitudinal e transversal das pilastras ilustrando a solução de reforço.

Para eliminar as juntas de dilatação os tabuleiros foram ligados entre si por meio de varões de pré-esforço que atravessam o topo da pilastra e comprimem os dois tabuleiros contra este elemento estrutural, Fig. 17.

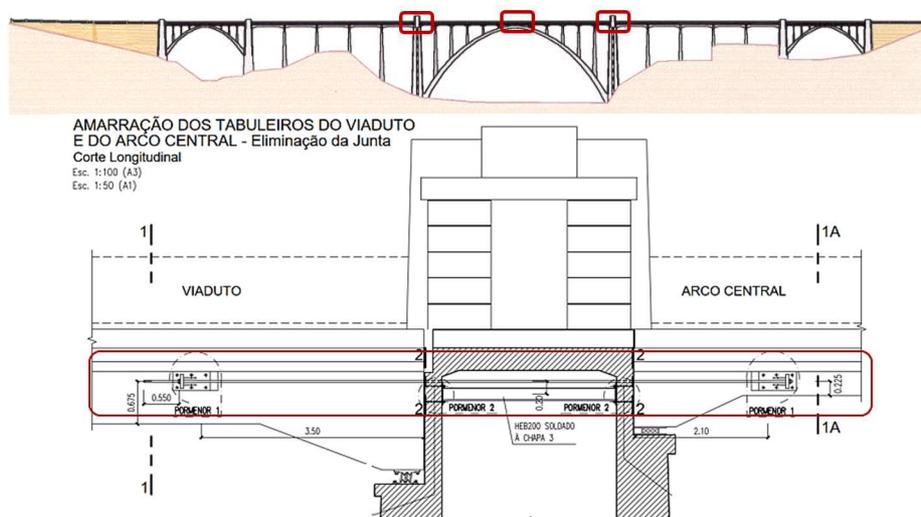


Figura 17. Ligação dos tabuleiros à pilastra com varões de pré-esforço.

Para substituir os aparelhos de apoio do tabuleiro dos viadutos nas pilastras dos arcos laterais foi necessário executar carlingas de modo a suportar provisoriamente o tabuleiro com macacos hidráulicos, Fig.18.

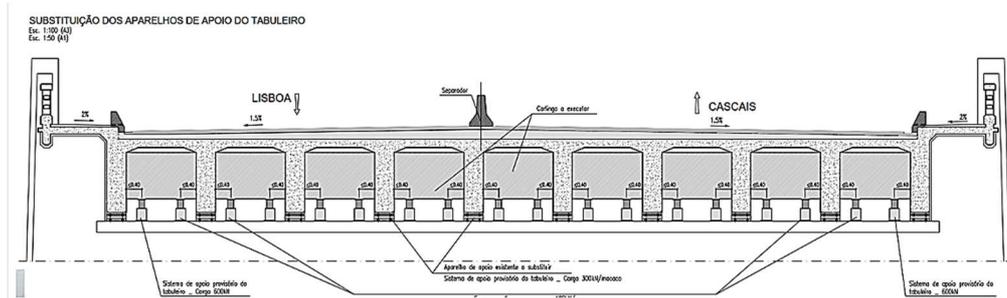


Figura 18. Substituição dos aparelhos de apoio. Apoio provisório do tabuleiro

Para além da abertura das juntas sísmicas, a intervenção incluiu ainda o reforço ao esforço transversal dos pilares-parede dos arcos laterais e de dois alinhamentos de pilares do arco central. O reforço destes pilares foi realizado com mantas CFRP, Fig.19.

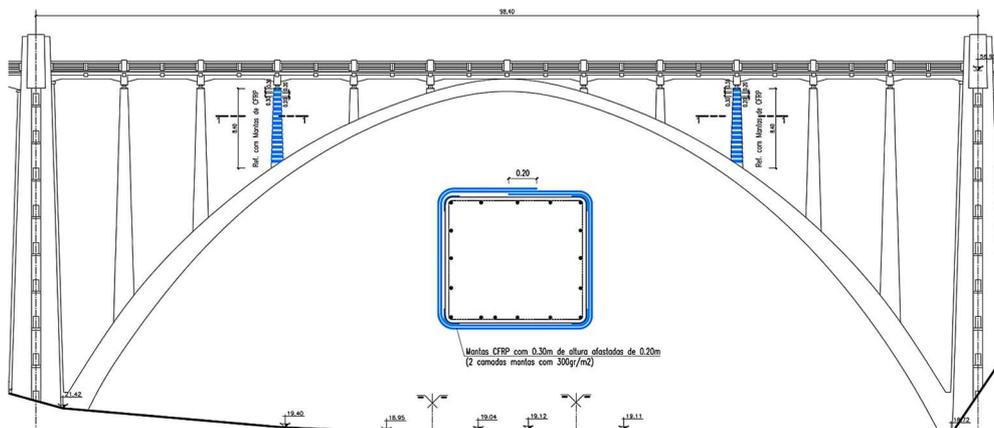


Figura 19. Reforço ao esforço transversal dos pilares do arco central

CONCLUSÕES

- Nas estruturas existentes referiram-se as principais deficiências que são frequentemente encontradas em pontes e foram indicados os princípios para a definição de soluções de intervenção para o seu reforço sísmico, salientando-se a vantagem da implementação das estratégias que envolvem a redução das exigências sísmicas.
- Apresentaram-se os diferentes tipos de deficiências relativas ao comportamento sísmico do Viaduto Duarte Pacheco os quais colocaram desafios relevantes para a sua resolução. Para o viaduto em causa foi implementada uma estratégia de intervenção correspondente à redução das exigências sísmicas e uma metodologia que consistiu no aumento da resistência e rigidez para controlo dos deslocamentos induzidos pelos sismos.
- A solução principal consistiu, essencialmente, na exploração das pilastras do arco central para controlo sísmico das estruturas do arco central e dos dois viadutos intermédios os quais constituíam as estruturas com maior nível de deficiências.
- O principal desafio colocado na implementação da solução foi o reforço das pilastras do arco central. Embora se trate de elementos com grande dimensão apresentavam deficiências relativas à capacidade de deformação e aos esforços de corte que foi necessário resolver com soluções de reforço adequadas.