Engenheiros Eminentes: Edgar Cardoso (1913-2000)

Tradução de artigo publicado na revista "Structural Engineering International" em março de 2020 para uma série de tributos aos engenheiros de todo o mundo que mais se destacaram no século XX.

Júlio Appleton, Engenheiro Civil

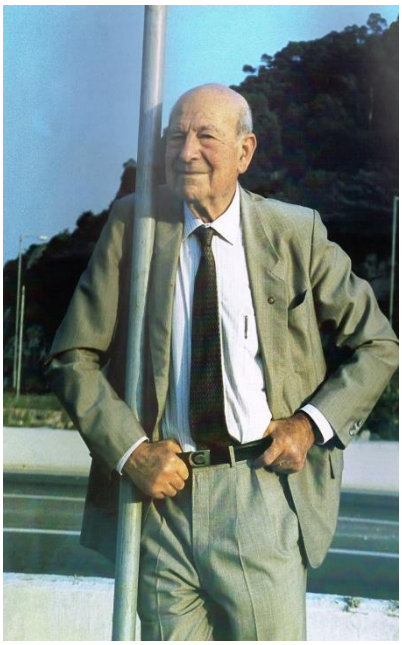


Figura 1– Edgar Cardoso

11/5/1913 – Nasceu no Porto

1937 – Licenciou-se em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

1938 a 1951 – Engenheiro Civil na JAE-Junta Autónoma das Estradas

1944 – Estabeleceu o seu gabinete de projetos

1951 a 1983 – Professor de Pontes no Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa

5/7/2000 – Faleceu em Lisboa

Referência a algumas das obras que projetou

1944 – Ponte de Abragão, sobre o Rio Tâmega, com um arco de alvenaria com uma relação flecha/vão de 9m/60m = 1/7

1952 – Ponte na Foz do Sousa, com um arco de betão armado de 115m de vão

1954 – Ponte de Santa Clara sobre o Rio Mondego, em Coimbra, com um tabuleiro em laje contínua de altura variável

1954 – Pontes do Cávado e do Caldo, com tabuleiro em betão armado apoiado em pilares ocos de cantaria com altura máxima de 60m

1954 – Reabilitação da Ponte Luíz I sobre o Rio Douro no Porto, uma ponte em arco executada em 1881 segundo projeto de T. Seyrig

1956 – Alargamento do tabuleiro e aplicação de pré-esforço exterior na Ponte D. Luiz, uma ponte com tabuleiro em estrutura metálica com vãos de 60m, construída em 1881 sobre o Rio Tejo, em Santarém

1957 – Ponte de Barca de Alva sobre o Rio Douro, com arcos múltiplos de 37,5m de vão

1962 – Alargamento do tabuleiro e aplicação de pré-esforço exterior na Ponte de Abrantes sobre o Rio Tejo, uma ponte construída em 1870 pela empresa Fives-Lille, com vãos de 42,5m+5x50,8m+42,5m

1962 – Ponte suspensa múltipla sobre o Rio Save, em Moçambique, com vãos de 90m+3x210m+90m

1962 – Ponte suspensa múltipla sobre o Rio Zambeze, em Moçambique, com vãos de 90m+3x180m+90m

1963 – Ponte de S. Fins, com um arco de relação flecha/vão de 5m/70m

1963 – Ponte da Arrábida sobre o Rio Douro no Porto, com um arco de 270m de vão

1964 – Pontes ferroviárias e pontes cais em betão pré-esforçado em Moçâmedes, Angola

1969 – Vários edifícios para a Universidade de Coimbra (Faculdades de Medicina, Matemática e Humanidades)

1972 – Hotel Sheraton, edifício de 30 pisos em Lisboa

1974 – Ponte de Mosteiró sobre o Rio Douro, com 110m de vão central

1974 – Ponte de Macau-Taipa, com um tabuleiro contínuo de 1231m realizado com elementos pré-fabricados

1975 – Ponte do Kwanza (Angola), ponte atirantada com um vão central de 260m e um tabuleiro misto aço/betão

1978 - Ponte da Figueira da Foz sobre o Rio Mondego, ponte de tirantes com um vão central de 225m

1984 – Prolongamento do Aeroporto do Funchal com uma extensão de 1800m (e estudo da sua extensão para 2781m), com uma laje pré-esforçada com 150m de largura apoiada em pórticos de betão armado, realizado sobre o mar

1992 – Ponte ferroviária de S. João sobre o Rio Douro no Porto, uma ponte com pórticos de betão armado pré-esforçado com o tabuleiro realizado por avanços sucessivos em consola e vão máximo de 250m

Edgar Cardoso (figura 1) foi o engenheiro de estruturas que mais se distinguiu no século XX em Portugal. Dedicou com entusiasmo grande parte da sua vida à profissão. Concebeu cada projeto por forma a atingir uma solução racional, estética e económica (1).

As pontes que concebeu tiveram um impacto positivo na cidade ou na região onde foram construídas porque, para além de satisfazerem uma necessidade, têm uma grande qualidade estética.

Nos seus projetos desenvolveu modelos reduzidos para avaliar o comportamento tridimensional das estruturas. Para o efeito, desenvolveu ele próprio instrumentos para medir e registar deformações e deslocamentos, nomeadamente extensómetros de contacto (extensómetros colados numa fina borracha e num acrílico) que, apertados contra o modelo, sem colagem, permitiam facilmente a sua posição em diversas secções.

Em 1950 construiu um autoinfluenciógrafo, equipamento que registava automaticamente linhas de influência para a resposta da estrutura para uma carga móvel deslocando-se segundo uma linha no tabuleiro. Para tal, um rolo de papel deslocava-se em sincronismo com a carga móvel,'0000000000000 sendo a amplitude do sinal do extensómetro transmitido à caneta registadora. Com estes modelos conseguia avaliar a resposta de estruturas altamente hiperestáticas, o que era analiticamente impossível nas décadas de 50 e 60 do século XX.

Edgar Cardoso considerava que, em geral, uma solução de tabuleiro contínuo tinha vantagem em relação à solução com sucessivos tramos simplesmente apoiados, nomeadamente para a segurança sísmica e manutenção da estrutura.

Acompanhava com muito detalhe a construção das obras que concebia, e projetava os equipamentos auxiliares necessários para a sua execução (nomeadamente os cimbres). Estabelecia um plano de monitorização e verificava o comportamento real realizando ensaios de carga. Com esse objetivo desenvolveu também equipamentos para medir deslocamentos e deformações *in situ*.

Como inventor criou também um equipamento para realizar fotografias panorâmicas em 360º sem distorção (a máquina fotográfica roda em torno do eixo ótico e o filme roda na direção contrária).

Fui aluno do Prof. Edgar Cardoso em 1971, seu colega como docente no IST e, nos últimos 30 anos, estudei vários dos seus projetos para reavaliar as condições de segurança de acordo com a recente regulamentação e para conceber e especificar as intervenções de reabilitação e eventual reforço em pontes como a da Arrábida, Figueira da Foz e Cávado. Esses trabalhos foram a oportunidade para compreender e conhecer em profundidade as conceções engenhosas e únicas dos seus projetos e confirmar o rigor dos seus cálculos, atualmente mais acessíveis com as novas ferramentas de modelação.

É difícil escolher um número reduzido de entre os mais de 500 projetos de obras novas e de reabilitação que realizou. Os exemplos seguintes ilustram alguns aspetos particulares e o valor estético das obras que concebeu.

Descrição de alguns projetos

Ponte do Cávado, 1952

Um aspeto particular desta ponte foi a adoção de pilares ocos de cantaria de granito que atingem 60m de altura, com uma secção losangular de 8mx4m com 0,30m e 0,40m de espessura (figura 2). Edgar Cardoso justifica a escolha com a disponibilidade local de mão-de-obra e de pedra de muito boa qualidade (resistência à compressão de 100 MPa). Na memória descritiva refere que britar a pedra para produzir agregados para betão, com uma resistência muito inferior à da pedra e com fluência e retracção era neste caso um contra-senso. Os pilares tinham a cada 4,5m de altura uma laje de betão para confinamento da alvenaria e evitar a encurvadura das paredes. Referia que esta solução era inspirada nos septos das canas de bambu. A espessura também não devia ser grande

para evitar tensões de tracção associadas à combinação das cargas permanentes e deformações impostas (temperatura e retracção do betão) no tabuleiro contínuo, transmitidas aos pilares

O tabuleiro é constituído por uma laje vigada com 205,8m de extensão e com vãos de 23m. Os apoios foram realizados com cilindros de betão de 1,4m de diâmetro e 0,9m de espessura, com placas de chumbo e conectores em varão nas ligações ao tabuleiro e aos pilares. Os apoios móveis funcionam como pêndulos; os apoios fixos têm uma base rígida sobre o topo dos pilares. Esta forma invulgar para os apoios contribui para a estética especial desta obra (figura 3).

Figura 2 – Ponte do Cávado após reabilitação recente

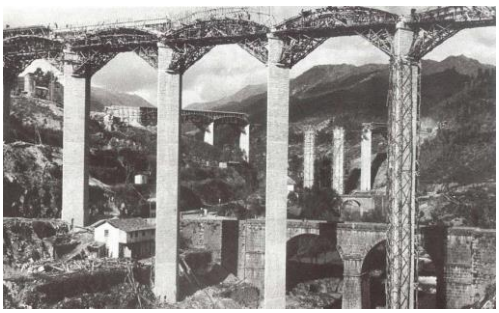


Figura 3 – Construção do tabuleiro e vista dos pilares de cantaria e apoios

Alargamento do tabuleiro e reforço da Ponte D. Luís sobre o Rio Tejo em Santarém, 1956

Edgar Cardoso aplicou a solução de reforço com pré-esforço exterior em diversas pontes com tabuleiro metálico, em Portugal e noutros países. Para pontes com estrutura treliçada, com o tabuleiro sobre o banzo superior, introduziu uma laje de betão armado para absorver o efeito de compressão do pré-esforço, transferindo assim para a treliça metálica apenas os efeitos das forças de desvio verticais. Nesta obra, a necessidade de reforço resultava do alargamento do tabuleiro e aumento das sobrecargas. Este tipo de intervenção tem um efeito global de reforço e é menos intrusivo do que outras alternativas (figura 4).

A Ponte Dom Luiz foi construída em 1881 e tem um tabuleiro com 593m de extensão e vãos de 66m. O tabuleiro tinha 5,9m de largura tendo sido aumentada para 8,1m.

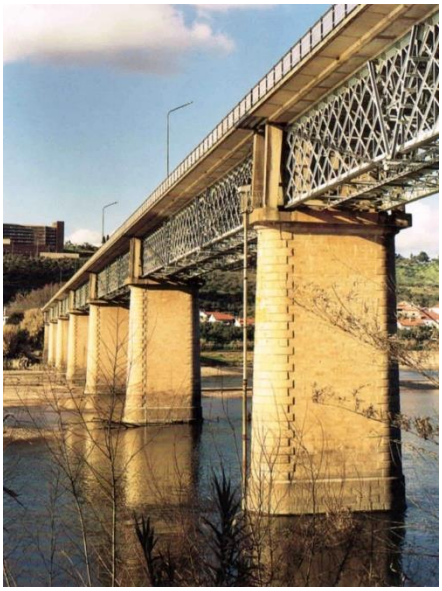


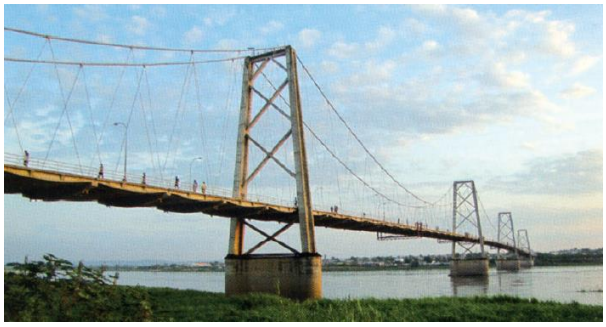
Figura 4 – Ponte Dom Luiz I após alargamento do tabuleiro e reforço com pré-esforço exterior

Ponte sobre o Rio Zambeze em Tete (Moçambique), 1962

A Ponte de Tete é uma ponte suspensa múltipla com vãos de 90m+3x180m+90m com pendurais inclinados, interligando o cabo principal e o tabuleiro (figura 5). Os cabos têm 7x146 fios de 5mm de diâmetro e 1800 MPa de resistência.

O tabuleiro foi realizado com 72 conjuntos de nove vigas pré-fabricadas, pré-esforçadas com vãos de 11,6m, apoiadas em vigas I transversais, onde estão fixados os pendurais.

As torres, com 40m de altura, têm dois montantes de secção I interligados por vigas transversais. As torres são fundadas em dois cilindros de 6m de diâmetro ligados por uma parede de betão armado.



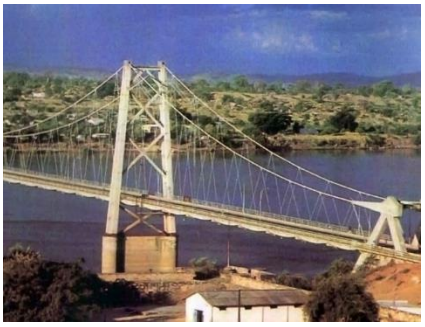


Figura 5 – A ponte suspensa de vãos múltiplos sobre o Rio Zambeze e o pormenor da amarração dos cabos nos encontros

Em 1978, uma grande inundação originou infra-escavação numa das torres que sofreu um assentamento a jusante de 30cm, o qual produziu uma inclinação com um deslocamento horizontal para jusante de 91cm no topo. Para resolver esta situação Edgar Cardoso concebeu um engenhoso sistema de reforço e reposicionamento da torre.

Na base de cada um dos montantes introduziu um maciço de reação provisório ligado ao existente com pré-esforço. Em torno do topo dos cilindros de fundação introduziu uma casca de betão com 20cm de espessura, deixando 19 negativos de 127mm de diâmetro. Através desses negativos foram introduzidas novas microestacas que atravessaram as fundações existentes e foram seladas em 10m

no maciço rochoso. As barras de alta resistência dessas microestacas foram pré-comprimidas com 50 toneladas cada.

Foi então aplicada uma força de 1600 toneladas em cada torre interpondo macacos hidráulicos entre o maciço provisório e os cilindros da fundação existente.

Os montantes e travamentos foram cortados e a reação da torre foi transferida através dos macacos para as microestacas, sem se verificar qualquer assentamento.

O montante de jusante foi então levantado 30cm na vertical e 7cm na horizontal. Após o reposicionamento da torre, os montantes foram reconstruídos na zona da intervenção e os elementos provisórios removidos (2).

Ponte da Arrábida sobre o Rio Douro, 1963

A Ponte da Arrábida tem 493,2m de extensão com um tabuleiro contínuo e dois arcos paralelos de eixo poligonal curvo, interligados por travessas. Os arcos com uma secção em caixão de largura aparente de 8m e uma espessura de 3m no fecho e 4,5m nas nascenças. Para melhorar a aparência dos arcos lateralmente existem pequenas nervuras (figura 6).

O tabuleiro em laje vigada, com vãos de 21,2m, apoia em vigas transversais, as quais transmitem as ações a quatro pilares de secção rectangular em cada alinhamento transversal. Transversalmente, o tabuleiro apresenta 12 vigas de largura e altura variáveis.

Um dos aspetos mais relevantes foi a execução do arco com um cimbre metálico vencendo a totalidade do vão e que, após a execução de um dos arcos, foi baixado e ripado lateralmente 15m para executar o segundo arco. Esta operação foi uma atração para o público e jornalistas de todo o mundo e que alguns anteviam um fracasso, o que evidentemente não sucedeu. Mas, para estar seguro de que tudo iria decorrer na perfeição, na véspera e à noite, o Professor e uma pequena equipa da obra ensaiaram esses procedimentos e voltaram a colocar o cimbre no primeiro arco para encenarem o espetáculo do dia seguinte (3).

O projeto e os modelos utilizados são um tratado de engenharia de estruturas. Na figura 7 apresenta-se um dos modelos adoptados para obter a resposta global desta estrutura. Nesse modelo utilizou o autoinfluênciografo para obter as linhas de influência dos esforços e deformações. À época não havia meios analíticos capazes de obter a resposta desta estrutura de secções de inércia variável e altamente hiperestática.

Figura 6 – Ponte da Arrábida após reabilitação recente

Figura 7 – Modelo reduzido da ponte

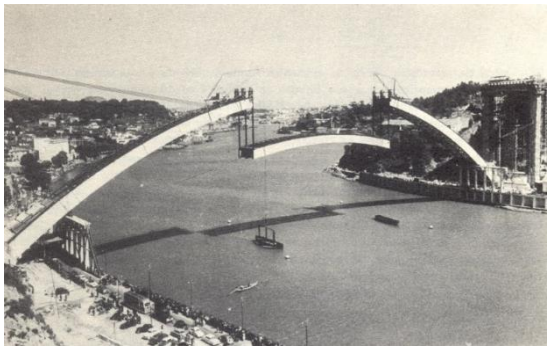


Figura 8 – Levantamento do último troço do cimbre metálico

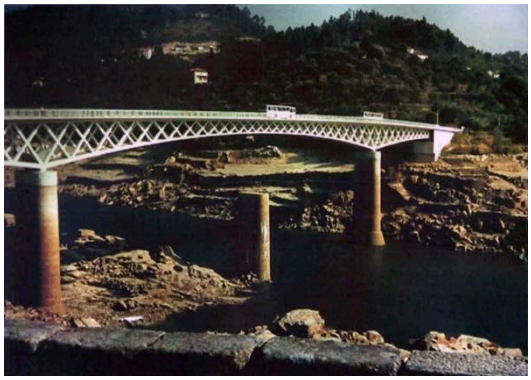
Ponte de Mosteiró sobre o Rio Douro, 1969

A necessidade de aumentar o gabarito fluvial antes do enchimento da albufeira da barragem do Carrapatelo e de resolver o problema de anomalias na fundação do pilar central da ponte, realizada em 1895, justificaram a intervenção que veio a ser concebida por Edgar Cardoso.

O tabuleiro em estrutura metálica treliçada que tinha vãos de 42m+55m+55m+42m e 4m de largura foi substituído por um tabuleiro em betão armado pré-esforçado com vãos de 42m+110m+42m, eliminando o pilar central e aumentando a largura para 9m. O tabuleiro metálico existente foi utilizado para apoio e acesso para realizar a nova estrutura. Para reduzir o peso transmitido ao tabuleiro metálico, o novo tabuleiro foi executado por sucessivas consolas pré-esforçadas. Os antigos pilares de alvenaria foram previamente consolidados e o topo elevado com a execução de uma nova laje de betão. Esta ponte é uma das obras mais bonitas e geniais concebidas por Edgar Cardoso (figuras 9 e 10).

Figura 9 – Ponte de Mosteiró. Não há palavras para traduzir a beleza desta ponte

Figura 10 – A antiga ponte construída em 1895



O novo tabuleiro e a eliminação do pilar central

Ponte Macau-Taipa, 1974

Para a ponte que liga as ilhas de Macau e Taipa, Edgar Cardoso concebeu uma solução integralmente pré-fabricada com um tabuleiro continuo de 1231m de extensão (figura 11).

O perfil longitudinal requerido para criar o gabarito necessário no canal de navegação faz lembrar o dorso de um dragão da tradição chinesa. Os vãos correntes são de 25m e o canal de navegação tem um gabarito vertical de 30m e um vão de 73m. O tabuleiro tem quatro vigas de altura variável. Os pilares também foram pré-fabricados sendo apoiados por estacas cravadas no solo. As barras que ligam elementos pré-fabricados foram seladas com resina epoxy.

Figura 11 – A Ponte Macau-Taipa e o vão no canal de navegação

Ponte da Figueira da Foz sobre o Rio Mondego (atualmente designada Ponte Edgar Cardoso), 1978

A Ponte da Figueira da Foz é uma ponte com o tabuleiro atirantado com um vão central de 225m e vãos laterais de 90m. Este projeto inclui ainda dois viadutos de acesso com uma extensão de 630m e 315m realizados em betão armado pré-esforçado e vãos de 45m.

O tabuleiro da ponte de tirantes foi realizado com uma laje de betão armado apoiada numa grelha metálica, sendo as vigas principais, onde são fixados os tirantes, constituídas por dois perfis I com 2m de altura (figura 12).

As ancoragens estão espaçadas 30m no tabuleiro e os cabos passam em selas no topo das torres que têm 85m de altura. As torres têm 4 montantes fundados em pegões de 5m de diâmetro e são travados por vigas pré-esforçadas na base.

Figura 12 – Vistas da ponte atirantada da Figueira da Foz após reabilitação recente

Ponte Ferroviária de São João sobre o Rio Douro,1992

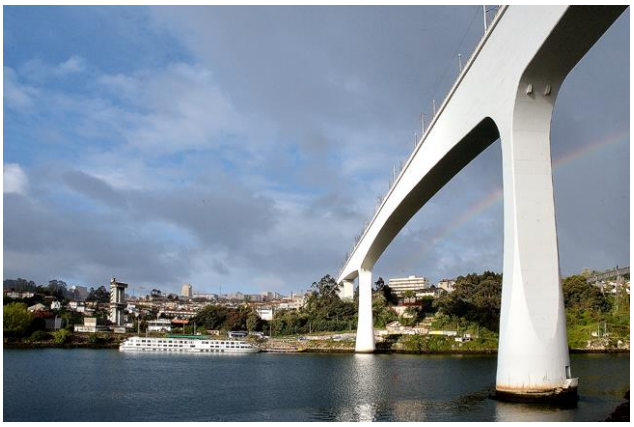
Esta ponte e os viadutos de acesso têm um tabuleiro contínuo de betão pré-esforçado com 1028,8m. O tabuleiro, construído por avanços sucessivos, tem um vão central de 250m com uma secção em caixão bicelular de 14m de altura sobre os pilares e 7m a meio vão.

O tabuleiro é monolítico com os pilares formando, assim, um pórtico. Edgar Cardoso referiu que quando estava a conceber a ponte idealizou a forma dos pilares modelando-a numa cenoura e depois estabeleceu a geometria matemática do parabolóide. A secção dos pilares varia de um circulo de 12m de diâmetro (espessura de 1m) na base até um rectângulo no topo com 6,7mx5m.

O tabuleiro foi construído por avanços sucessivos com aduelas de 5m a 7,5m e aplicação de seis cabos de 24 cordões em cada aduela. Para os cabos de pré-esforço utilizou bainhas em tubo de aço com uma secção que participou como armadura passiva na resistência das secções. Foram adoptados cabos longitudinais interiores e exteriores (dentro da secção em caixão) e as almas foram pré-esforçadas verticalmente com monocordões.

As fundações dos pilares principais foram fundados na rocha em sapatas com 14m de diâmetro reforçadas com 130 pequenas estacas de 50cm de diâmetro e 12m de profundidade.

De realçar também que os carris foram fixados diretamente à estrutura do tabuleiro.



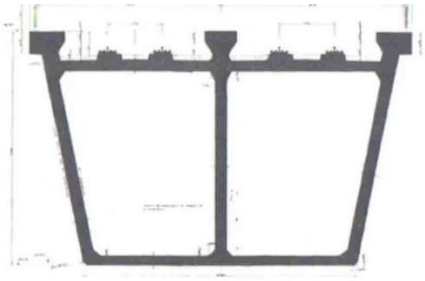


Figura 13 – Vista geral da Ponte S. João

Secção transversal

Referências

(1) Edgar Cardoso 1913-2000, Fundação Edgar Cardoso 2001
(2) Edgar Cardoso - engenheiro civil, Luis Lousada Soares, FEUP 2003
(3) Ponte da Arrábida – Monumento Nacional, Matos Fernandes, U. Porto 2016