

Pontes de tirantes ou em bowstring ferroviárias

Railway cable-stayed or bowstring bridges

António Reis
Ricardo Afecto

Resumo

As especificidades das pontes de tirantes ou em “bowstring” cujo requisito funcional é serem adoptadas para tráfego ferroviário relacionam-se, além de aspectos conceptuais como é o caso tipo de tabuleiro e da sua suspensão (lateral ou axial) com aspectos específicos, como por exemplo, a deformabilidade e a vibração do tabuleiro, os problemas de fadiga nomeadamente nos tirantes, etc.

A utilização futura deste tipo de solução para pontes ferroviárias de grandes vãos afigura-se promissora, com vantagens em relação às pontes suspensas ferroviárias, nomeadamente no controlo da deformabilidade do tabuleiro. Porém, o aumento dos vãos induz em geral problemas acrescidos de estabilidade aerodinâmica, de despreendimento de vórtices e até, no limite, a possibilidade de excitação paramétrica dos tirantes. No outro extremo, colocam-se as pontes ferroviárias de pequeno a médio vão, até à ordem dos 100 a 150 m, onde as pontes com “pré-esforço extradorsal” podem ser vantajosas.

Apresentam-se exemplos de estudos e projectos que temos vindo a realizar.

Abstract

The specific characteristics of cable-stayed or bowstring bridges whose functional requirement is to be adopted for rail traffic are related, in addition to conceptual matters such as the type of deck and its suspension (lateral or axial) to specific aspects, such as, for example, deformability and vibration of the deck, fatigue problems in particular in the cables/hangers, etc.

The future use of this kind of structural solution for large spans railway bridges seems promising, with advantages over railway suspension bridges, namely in controlling the deformability of the deck. However, the increasing of span lengths generally leads to rising aerodynamic stability issues as, for example, vortices shedding and even, at the limit, the possibility of parametric excitation of the cables/hangers. On the opposite side, for small to medium-span railway bridges with span lengths lower than 100 to 150m, the “extradosed prestressing” solution can be advantageous.

Examples of studies and projects that we have been carrying out are presented.

Palavras-chave: Pontes / Pré-esforço extradorsal / Tirantes / Bowstring / Fadiga

Keywords: Bridges / Extradosed prestressing / Stay-cables / Bowstring / Fatigue

António Reis

Consultor. Dir. Técnica
GRID International – Consulting Engineers
Lisboa, Portugal
antonio.reis@grid.pt

Ricardo Afecto

Gestor de Projecto
GRID International – Consulting Engineers
Lisboa, Portugal
ricardo.affected@grid.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

REIS, A. [et al.] – Pontes de tirantes ou em bowstring ferroviárias. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (juho 2023) 119-136.

1 Introdução

Para além do transporte ferroviário ser um dos meios de transporte mais importantes no contexto do desenvolvimento nacional, tem-se afigurado como preferencial no que se refere sustentabilidade e ambiente. O aumento da velocidade do material circulante e as exigências ao nível da operacionalidade (conforto, vibração, etc.) tornam as pontes ferroviárias mais exigentes no que se refere ao projecto e construção.

Um dos primeiros artigos sobre uma visão global da utilização de pontes de tirantes ferroviárias foi apresentado há cerca de 30 anos no Simpósio da IABSE 1991 [3], onde um dos autores (A. Reis) do presente artigo participou. Desde então a possibilidade da utilização de tirantes em pontes ferroviárias tem merecido a atenção dos autores.

As cargas permanentes e as sobrecargas nas pontes ferroviárias são consideravelmente superiores às das pontes rodoviárias. Ao nível do projecto, o aumento dos vãos induz condicionamentos muito exigentes associados a aspectos de deformabilidade, vibração e acelerações verticais do tabuleiro.

No domínio dos médios/grandes vãos destacam-se as pontes ferroviárias de tirantes ou em “*bowstring*” onde os problemas referidos são, em geral, particularmente condicionantes. Os dois tipos de pontes – tirantes e “*bowstring*”, são em geral preferidos até um certo limite de vão (diga-se de 500 a 1000 m) a partir do qual as pontes suspensas começam, hoje em dia, a apresentar-se como as soluções preferenciais. Todavia, pode-se constatar que, para grandes vãos, são frequentemente adoptadas soluções rodoferroviárias por, em geral e do ponto de vista económico, ser possível tirar partido de uma redução de custos, pelo menos em termos de infra e meso-estrutura. As superestruturas das pontes rodoferroviárias são frequentemente a dois níveis reservando-se, em geral, o tabuleiro inferior para a parte ferroviária. No entanto, a colocação da infraestrutura rodoviária toda ao mesmo nível é possível, tem sido adoptada mas conduz geralmente a tabuleiros de grande largura, como é o caso da 3.ª Travessia do Bósforo [1] inaugurada em 2016 e referida neste artigo.

Um aspecto a realçar é o facto das pontes de tirantes e em “*bowstring*” apresentarem semelhanças importantes, razão da sua associação neste artigo. Primeiramente, por estes dois tipos de pontes (tirantes e “*bowstring*”) possuírem elementos de suspensão do tabuleiro, nomeadamente tirantes e pendurais constituídos por cabos ou barras. Esses elementos transmitem as forças com que suspendem o tabuleiro aos mastros (torres) no caso das pontes de tirantes ou ao arco superior no caso das pontes em “*bowstring*”. Nas duas figuras seguintes esquematizam-se os respectivos funcionamentos de transmissão das forças.

Em ambos os tipos de pontes referidos, os cabos/barras induzem esforços axiais importantes de compressão nos tabuleiros das pontes de tirantes e uma força de tracção pelo arco no tabuleiro das pontes em “*bowstring*”. Por sua vez, o elemento estrutural que vai suportar a força transmitida pelos elementos de suspensão é um mastro (pontes de tirantes) ou um arco (pontes em “*bowstring*”). A designação de “*bowstring*” está associada ao funcionamento do arco como uma barra curva em compressão e ao tabuleiro em

tracção como uma “corda esticada”. Deve dizer-se que nas pontes em “*bowstring*” com pendurais inclinados, como numa realização recente cujo projecto efetuámos (Viaduto Essalam em Rabat), estes também induzem esforços axiais na laje de tabuleiro.

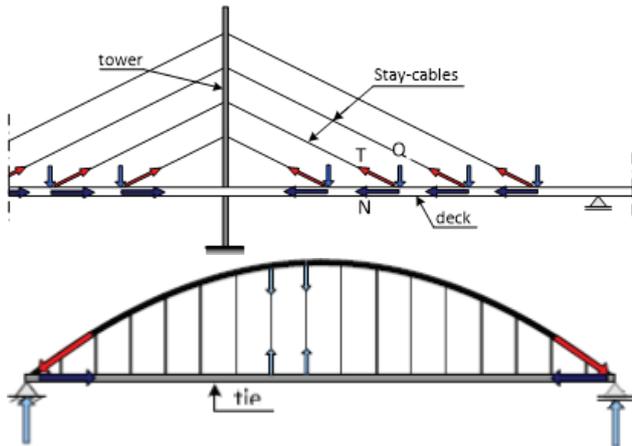


Figura 1 Modelos de transmissão de forças em pontes de tirantes e em “*bowstring*” (adaptado de [2])

As superestruturas de qualquer um dos dois tipos de pontes (tirantes ou “*bowstring*”) podem ter uma suspensão lateral por dois planos ou axial por um único plano de tirantes /pendurais. Os tirantes/pendurais são ligados à superstrutura (tabuleiro) por ancoragens que funcionam como articulações. Os tabuleiros podem ser de betão armado, pré-esforçado, metálico ou misto aço-betão. O tipo de superstrutura pode ser laje, laje vigada ou em caixão.

As superestruturas, em ambos os tipos de pontes, funcionam para as sobrecargas de tráfego como vigas sobre fundação elástica. Para as cargas permanentes a regulação dos tirantes/pendurais pode ser total (compensação total das cargas permanentes) ou mais geralmente parcial. No primeiro caso a força vertical da carga permanente entre dois tirantes/pendurais é totalmente absorvida pela componente vertical do esforço no tirante/pendural, o que faz com que o tabuleiro funcione (para as cargas permanentes) como se tivesse múltiplos apoios fixos. Os tirantes/pendurais são ajustáveis durante a fase construtiva/montagem do tabuleiro para atingir a geometria (altimetria) desejada; a monitorização em forças e/ou em geometria é sempre possível (desejável) e viável durante a vida da obra.

2 Utilização e tipologias

As pontes de tirantes em geral – pontes rodoviárias, ferroviárias e de tráfego misto rodoferroviário – têm sido utilizadas para uma variedade de vãos, com diversas tipologias, geométricas e de materiais, no tabuleiro. Na Figura 2 apresenta-se um gráfico elucidativo da evolução de vãos principais ao longo dos anos.

No entanto, as soluções de tirantes têm sido pouco utilizadas para pontes ferroviárias. É possível que os eventuais problemas de fadiga nos cabos sob acção de variações importantes de tensão, estejam a ser condicionantes da opção pela tipologia referida. É

um problema efectivamente a considerar, bem como o problema da deformabilidade e da vibração excessiva sob as sobrecargas ferroviárias. Acrescem os aspectos específicos de rotura de tirantes sob efeitos de acções acidentais de descarrilamento.

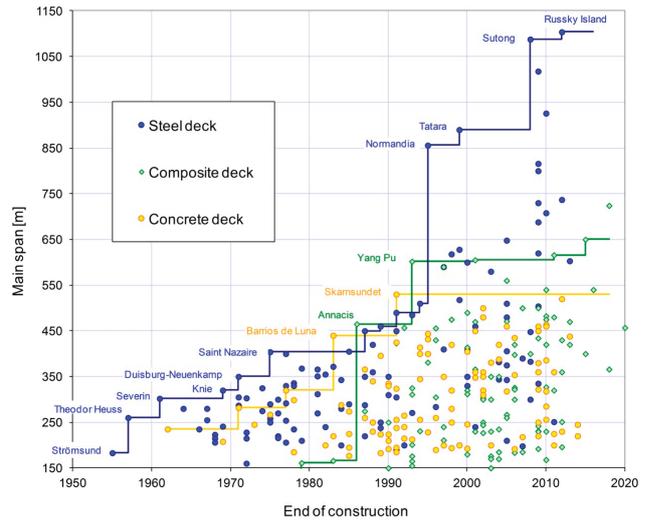


Figura 2 Utilização de pontes de tirantes e evolução dos vãos ao longo dos anos [2]

A utilização de pontes de tirantes com tráfego misto ferroviário e rodoviário coloca problemas específicos nomeadamente ao nível da concepção (tabuleiros a nível único ou a dois níveis) e ao nível da verificação da segurança na combinação de acções de tráfego e definição de estados limites de utilização.

Para grandes vãos, a referida opção afigura-se promissora, com vantagens em relação às pontes suspensas ferroviárias, nomeadamente no controlo da deformabilidade do tabuleiro. No outro extremo colocam-se as pontes ferroviárias de pequeno a médio vão, até à ordem dos 100 a 150 m, onde as soluções de tirantes na sua configuração de “pré-esforço extradorsal” podem apresentar imensas vantagens. Por outro lado, ao nível do tipo de tráfego, a utilização de pontes de tirantes para tráfego ferroviário ligeiro, como é o caso das pontes para o Metropolitano, reduz muitas das dificuldades com que se deparam as pontes para tráfego ferroviário misto-pesado e passageiros, facilitando a utilização de tirantes neste tipo de pontes.

Convém, no entanto, atender a que existem problemas específicos para pontes ferroviárias, em geral associados aos Estados Limites de Utilização com impacto na concepção deste tipo de pontes. Nos estudos que desde há cerca de 30 anos temos vindo a fazer nesta área, referem-se em especial os associados à deformabilidade e vibração do tabuleiro. O primeiro pode, em certa medida, condicionar a relação L_y/L (rácio vão lateral/vão principal). Preferencialmente, este valor deve ser mais baixo em pontes de tirantes ferroviárias do que nas pontes de tirantes rodoviárias. A utilização de pilares nos tramos laterais é naturalmente benéfica do ponto de vista estrutural, mas geralmente inconveniente do ponto de vista estético.

Nas pontes de tirantes, os vãos principais podem atingir 400 a 600 m, mas é no domínio dos vãos dos 100 aos 300 m que muitas das

realizações têm-se afigurado mais competitivas e interessantes. Existem dois aspectos que, em certa medida, podem influenciar fortemente a concepção:

- o tipo de tráfego ferroviário: do limite inferior das pontes para os Metropolitanos ao limite superior correspondente às pontes para tráfego ferroviário pesado e misto (mercadorias e passageiros);
- a relação sobrecarga/carga permanente: naturalmente mais crítica nas pontes de tirantes ferroviárias, é determinante para as condições de utilização.

No limite inferior dos vãos, encontram-se as pontes ferroviárias de tirantes com vãos inferiores a 100 a 150 metros, onde a tipologia de pontes com pré-esforço extradorsal se afigura como solução promissora e competitiva em relação às pontes tradicionais construídas por avanços sucessivos em caixão de betão pré-esforçado. Na Figura 3 apresenta-se uma das pontes construída há mais de 10 anos no Canadá para tráfego de metropolitano, peões e bicicletas (sob as consolas laterais do tabuleiro superior ferroviário). O tabuleiro em betão pré-esforçado tem uma suspensão axial em harpa, funcionando os tirantes como pré-esforço extradorsal. O vão principal tem 180 metros.



Figura 3 North Arm Bridge , British Columbia , Canada , 2009. Projecto Buckland & Taylor

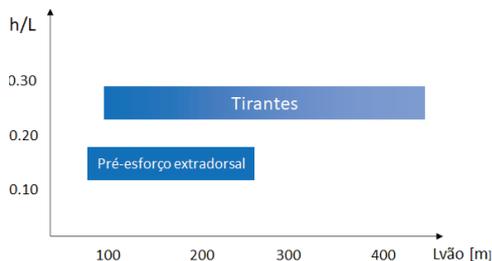


Figura 4 Domínios tipo da relação h/L pontes de tirantes ou com pré-esforço extradorsal

Convém ter em conta que a passagem de uma tipologia (pontes de tirantes) a outra (pontes com pré-esforço extradorsal) se reflecte essencialmente na relação h/L , correspondente à relação entre a altura dos mastros (torres) e o comprimento do vão principal. Nas

pontes de tirantes este valor é da ordem de 0,2 a 0,25 enquanto nas pontes com pré-esforço extradorsal essa relação não ultrapassa em geral 0,10 a 0,15 - Figura 4.

Numa das secções adiante, discute-se o aspecto específico do dimensionamento dos tirantes nas pontes com pré-esforço extradorsal.

O funcionamento básico de uma ponte em "bowstring" está esquematizado na Figura 5. As forças, N_q , transmitidas pelo tabuleiro transferem-se ao arco que, por sua vez, fica sujeito a esforços axiais de compressão, N_a . Estes esforços, variáveis ao longo do desenvolvimento do arco, são equilibrados por esforços de tracção, N_h , no tabuleiro.

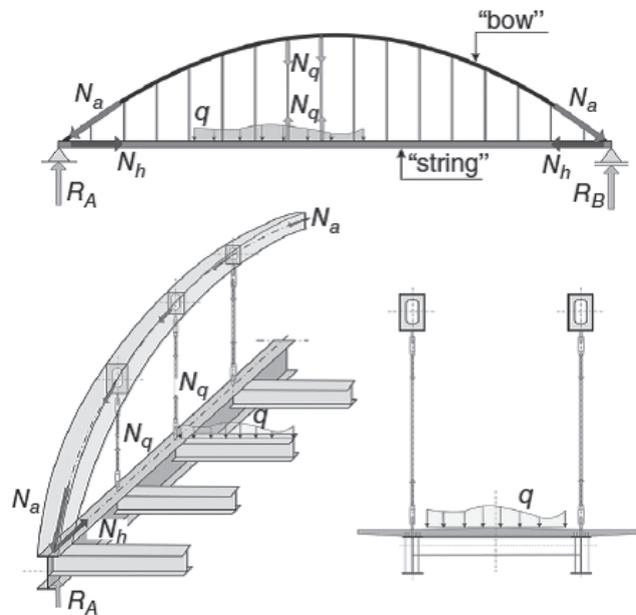


Figura 5 Funcionamento de uma ponte em "bowstring" com suspensão lateral, adaptado de [2]

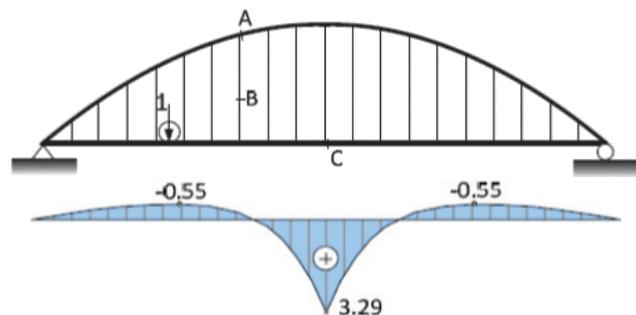


Figura 6 Linha de influência na secção de meio vão do tabuleiro na Ponte sobre o Rio Sado

Na sua forma mais corrente, as pontes em "bowstring" possuem dois planos de pendurais, verticais ou inclinados (Figura 5). Contudo é possível optar por uma tipologia de suspensão axial com um único plano de pendurais ao eixo do tabuleiro, conforme adiante se verá.

Por agora refira-se que o funcionamento do tabuleiro suspenso por dois planos de pendurais ou por um único, como é o caso da Ponte Ferroviária sobre o Sado, cujo projecto desenvolvemos, é, à semelhança das pontes de tirantes, um funcionamento do tipo viga continua sobre apoios elásticos. As características da estrutura são apresentadas em [15]. É esse comportamento que se ilustra na Figura 6, apresentando-se a linha de influência dos momentos flectores na secção a meio vão do tabuleiro constituído por um caixão unicelular.

3 Pontes com tráfego rodoferroviário

3.1 Aspectos de Concepção

Nas pontes com tráfego rodoferroviário, existem, do ponto de vista conceptual, duas opções base:

- pontes com um tabuleiro a um só nível;
- pontes com tabuleiro a dois níveis, sendo em geral o superior para tráfego rodoviário e o inferior para o tráfego ferroviário.

Este último tipo de opção (a dois níveis), existe no caso das pontes suspensas, cujo exemplo a nível nacional é a Ponte 25 de Abril. A 1.ª opção, tabuleiro a um só nível, conduz geralmente a uma solução com um tabuleiro muito largo, mesmo admitindo apenas uma via dupla. Um exemplo recente, em que os autores participaram no projecto (projecto dos tramos laterais, estrutura metálica do topo das torres e estudos base de fixação da via-férrea) é o da 3.ª Travessia do Bósforo (Ponte Yavuz Sultan Selim), concepção de M. Virlogeaux e J. François Kleinf (T-Ingénierie) cuja largura da secção transversal é de aproximadamente 60 m e que se representa na Figura 7 e na Figura 8.



Figura 7 Vista da 3.ª Travessia do Bósforo – Ponte rodoferroviária, suspensa e atirantada (projecto de execução TIng, Greisch, Grid)



Figura 8 Secção transversal da 3.ª Travessia do Bósforo – Ponte rodoferroviária, suspensa e atirantada (projecto de execução TIng, Greisch, Grid)

Esta ponte, cujo vão central é de 1408 m, tem um tabuleiro constituído por um caixão metálico na zona central e por caixões multicelulares de betão armado pré-esforçado nos tramos laterais e até cerca de pouco mais de 20 m a partir do apoio nas torres. A rigidez necessária do tabuleiro para o tráfego ferroviário é conseguida pela inserção de tirantes em combinação com os cabos da ponte suspensa. Esses cabos são inseridos numa estrutura metálica “*Tower Top Beam*”, com cerca de 100 m de altura, localizada no topo das torres com 322 m de altura. Trata-se de uma suspensão lateral por dois planos de tirantes inseridos nos planos dos cabos principais da ponte suspensa. Deve dizer-se que a solução pensada inicialmente no projecto original para a instalação ferroviária na Ponte 25 de Abril, nos anos 60, previa também a instalação de tirantes a funcionar em conjunto com os cabos principais da ponte suspensa. Aquando do projecto da instalação ferroviária nos anos 90 do século passado, para a qual realizámos os Estudos Base e participámos como consultores e revisores do Projecto de Execução realizado pelos projectistas originais da ponte – Steinmam, NY (hoje em dia Parsons NY) – colocou-se novamente essa hipótese. Em termos de limites de deformabilidade sob as sobrecargas ferroviárias, as secções mais críticas eram as secções do tabuleiro apoiadas nas torres. Acontece que os comboios (passageiros – *double deck* – 13 800 KN e de carga) que se pretendia fazer passar na ponte aquando da instalação ferroviária nos anos 90, correspondiam a sobrecargas 3,5 vezes maiores do que as previstas 35 anos antes (década de 60). Os tirantes necessitavam assim de resistir a forças consideravelmente maiores, o que induzia problemas de fadiga nas ligações à viga de rigidez do tabuleiro e necessidade de importantes reforços na sua estrutura metálica. Por outro lado, sempre defendemos que essa solução do ponto de vista estético iria, em certa medida, destruir um ícone da cidade de Lisboa. A opção por instalar cabos paralelos, a 3 m de distância dos cabos existentes, começou a revelar-se no Estudo Prévio, a solução mais interessante. Essa era a solução que defendíamos e que acabou por ser a adoptada. Na Figura 9 apresenta-se o esquema da solução pensada nos anos 60 e na Figura 10 a solução adoptada nos anos 90.

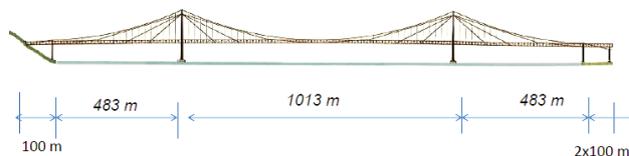


Figura 9 Ponte 25 de Abril. Projecto original (1965) para a 2.ª Fase instalação do tabuleiro ferroviário

Uma das obras rodoferroviárias que marcou o domínio das pontes de tirantes, foi a ponte de Oresund entre a Dinamarca e a Suécia, construída no início do século XXI. Trata-se de um exemplo de um tabuleiro a dois níveis, constituído por uma treliça metálica/mista, com um vão principal de 490 m.

O projecto foi lançado pelo Dono de Obra, com base num “*Tender Design*” que permitia algumas adaptações aos concorrentes, nomeadamente a nível dos vãos tipo dos tramos correntes que podiam estar entre os 100 e os 140 m (solução adoptada) e a nível da estrutura inferior de suporte da via ferroviária. A largura do tabuleiro é de 35,5 m (na solução como construída), ao eixo das ancoragens

dos tirantes. O vão de 490 m possui uma “suspensão em harpa”, com a particularidade de as diagonais da treliça apresentarem precisamente a inclinação dos tirantes. O tabuleiro inferior suporta uma via balastrada, sobre o banzo superior do caixão inferior em placa ortotrópica. A deformabilidade do tramo central foi controlada e reduzida por efeito dos pilares de ancoragem nos tramos laterais. A altura total do tabuleiro, incluindo o tabuleiro inferior rodoviário, é de 11,17 m. As cordas superiores e inferiores da treliça têm secção tubular em chapa soldada, conforme se mostra na Figura 11.



Figura 10 Ponte 25 de Abril – Solução adoptada (2.º cabo aquando da execução (1998) para o reforço exigido pela instalação ferroviária

Uma solução semelhante à adoptada para a ponte de Oresund, foi estudada por nós aquando do desenvolvimento do Projecto de Referência para a TTT – Terceira Travessia do Tejo, em Lisboa – travessia Chelas-Barreiro (Figura 12 e 13). Com um tabuleiro rodoviário cuja particularidade principal era a necessidade de acomodar 4 vias ferroviárias (em vez das 2 geralmente adoptadas) pois pretendia-se inserir as linhas para a Alta Velocidade (AV) e para tráfego ferroviário convencional (CV). Esta exigência funcional foi o maior condicionamento para este projecto, muito mais do que o vão de 540 m (recorde a nível mundial para pontes de tirantes ferroviárias) exigido pelo canal de navegação e pelo seu enviesamento de 7.º em relação ao eixo da ponte.

A superestrutura, com 34,76 m de largura total, contemplava as 2 vias AV + 2 vias CV no tabuleiro inferior e 6 vias de tráfego rodoviário no tabuleiro superior. O comprimento total da ponte, entre juntas de dilatação dos lados de Lisboa e do Montijo, era de 7143 m, tendo a ponte atirantada, sobre o Canal de Cabo Ruivo, um desenvolvimento de 1140 m sem qualquer junta de dilatação intermédia. Existiam naturalmente aparelhos de dilatação de via nas secções extremas da ponte atirantada para a resolução dos efeitos de interação via-estrutura.

A ponte, no seu conjunto, foi idealizada como um objecto único na paisagem do estuário do Tejo (Figura 13), reflectindo uniformidade, ordem e consistência ao longo do seu comprimento total com cerca de 7,3 km, subdividida em:

- Ponte principal de tirantes (vão de 540 m) sobre o canal de Cabo Ruivo com 1140m;

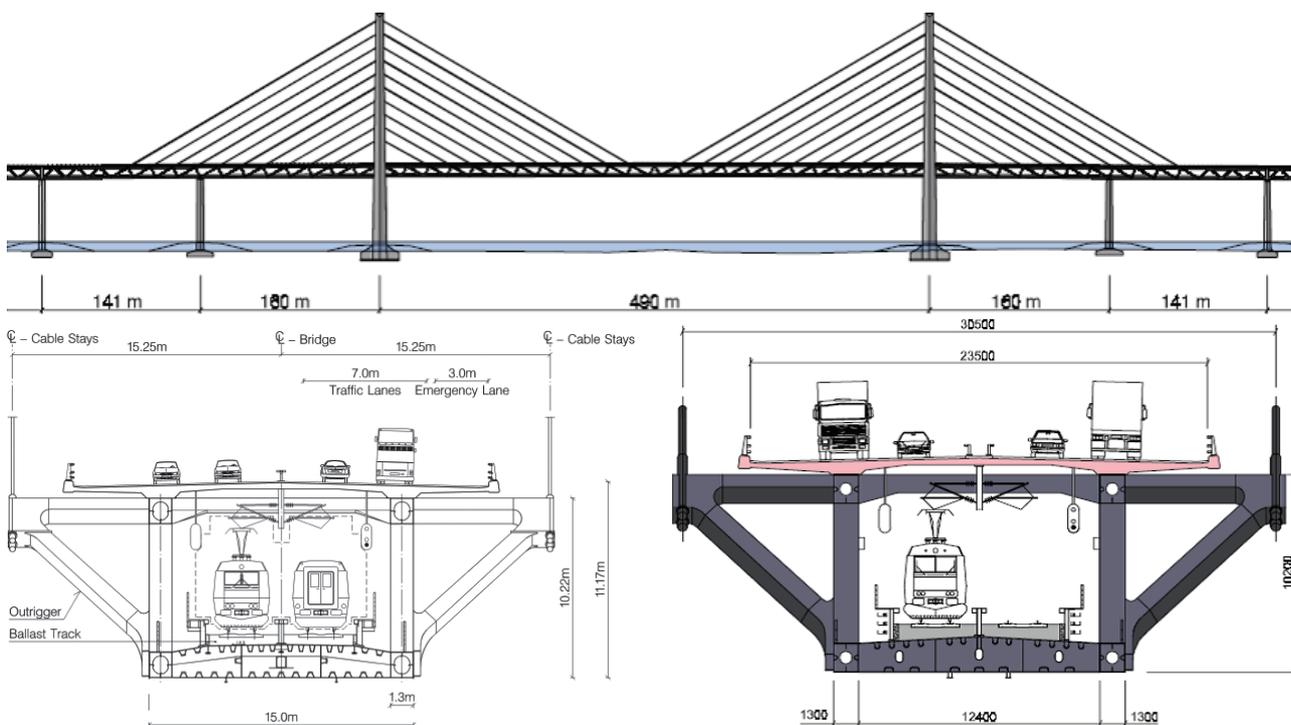


Figura 11 Ponte de Oresund (adaptado de [4] e [5])

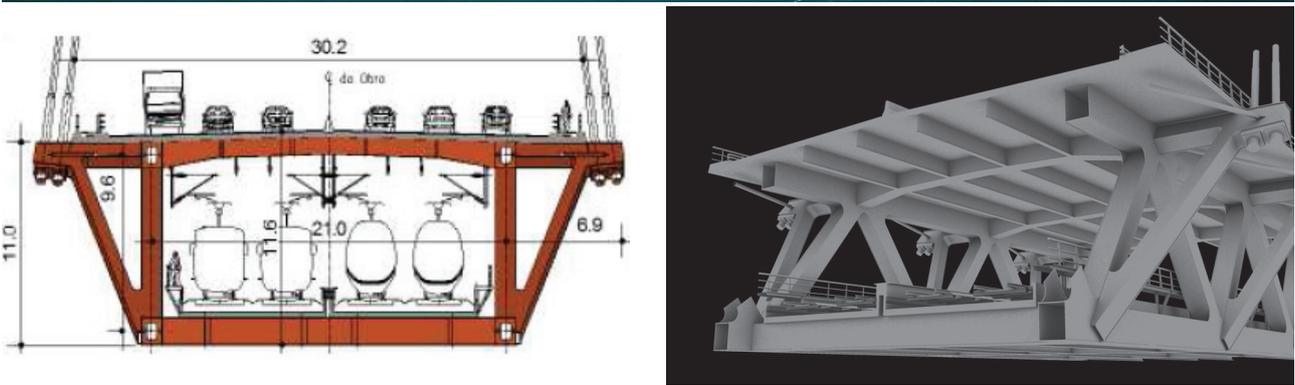


Figura 12 Projecto de referência para a TTT em Lisboa. Fotomontagem e secção transversal e modelo do tabuleiro na zona da ponte de tirantes



Figura 13 Vista nocturna da TTT, projecto de referencia. Fotomontagem. Integração no Estuário do Tejo

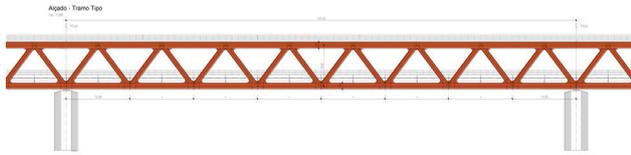


Figura 14 TTT. Alçado e Modelo 3D do modulo tipo

- Duas pontes principais sobre o Canal Central e o Canal Sul, com 645 m cada (total 1290 m);
- Pontes entre canais com 3315 m.

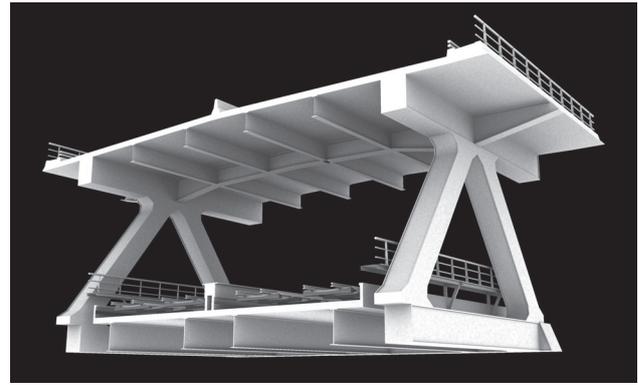
Os tramos tipo das duas pontes principais e pontes entre canais seriam tramos de 120 m de vão constituídos por treliças mistas Warren conforme se mostra na Figura 14. O aço em toda a superestrutura seria o aço termomecânico S460M ou S460ML consoante as espessuras máximas de chapas.

A restante parte da ponte para atingir a margem sul, estava incluída no Viaduto Sul onde os tabuleiros superior e inferior eram subdivididos em estruturas de transição para o tráfego rodoviário e ferroviário.

3.2 TTT – Aspectos Específicos da Ponte sobre o Canal de Cabo Ruivo

No caso da ponte de tirantes na TTT, constituída pela Ponte sobre o Canal de Cabo Ruivo, o tabuleiro contínuo com 1140 m tem a seguinte distribuição de tramos: 90+210+540+210+90.

A flecha admissível sob acção das sobrecargas ferroviárias é de 1,0 m (cerca de 1/600 do vão). Para o controlo desta flecha estudaram-se duas soluções: uma com dois pilares de retenção nos tramos de 210 m de vão e outra apenas com os pilares de retenção na



extremidade dos tramos de 210 m (P2 e P5), aumentando-se a rigidez dos tirantes de retenção. Por razões estéticas e de fundação, esta última solução acabou por ser a solução adoptada no Projeto de Referência.

Nas análises dinâmicas realizadas para avaliar deslocamentos e acelerações devidas à acção das sobrecargas ferroviárias (comboios de AV limitados a 120 km/h – modelos HSLM), foram obtidos deslocamentos máximos de cerca de 0.08 m e acelerações verticais máximas a rondar os 0.30 m/s² conforme se ilustra na Figura 16. Estes valores estavam perfeitamente dentro dos valores considerados admissíveis de acordo com a EN 1990.

Deve referir-se que as vibrações excessivas do tabuleiro poderão causar instabilidade ao nível do balastro e, para além disso, desconforto nos passageiros conforme anteriormente referido. No Anexo A2 da EN 1990 são definidos os valores de 3.5 m/s² e 5.0 m/s² para os valores máximos das acelerações verticais ao nível do tabuleiro para o caso de via balastrada e via com fixação directa, respectivamente. O nível de conforto dos passageiros é também controlado pelo valor máximo expectável para a aceleração no interior da carruagem – b_v . O valor limite para esta aceleração depende do nível de conforto exigido para a via. Em alternativa a uma análise dinâmica, que incluía a interacção veículo (com o seu sistema de suspensão-estrutura) – Figura 17 – que permita determinar os valores das acelerações sentidas pelos passageiros

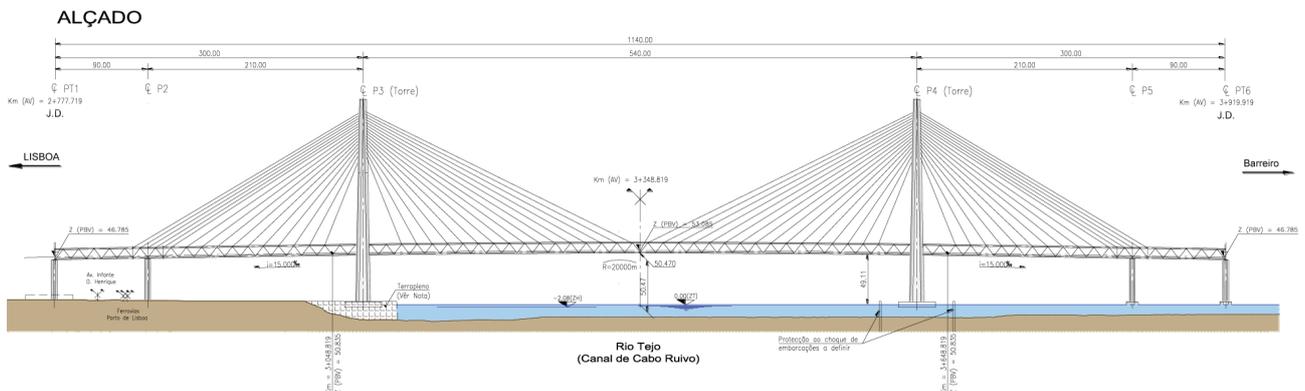


Figura 15 Alçado lateral da ponte de tirantes na TTT

no interior das carruagens, é possível fazer um controlo indirecto, correlacionando a flecha máxima devida ao tráfego ferroviário com a velocidade de projecto.

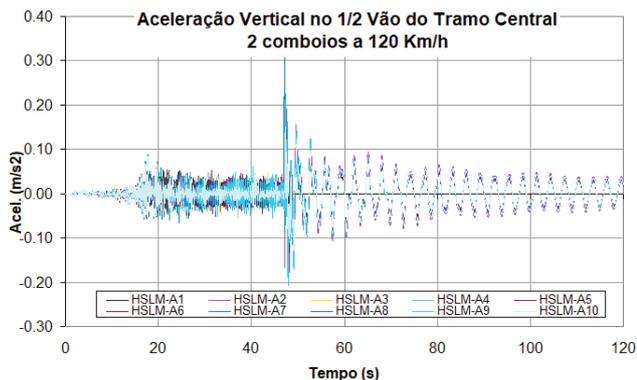


Figura 16 Acelerações verticais obtidas através das análises dinâmicas à ponte da TTT devidas às acções da sobrecarga ferroviária

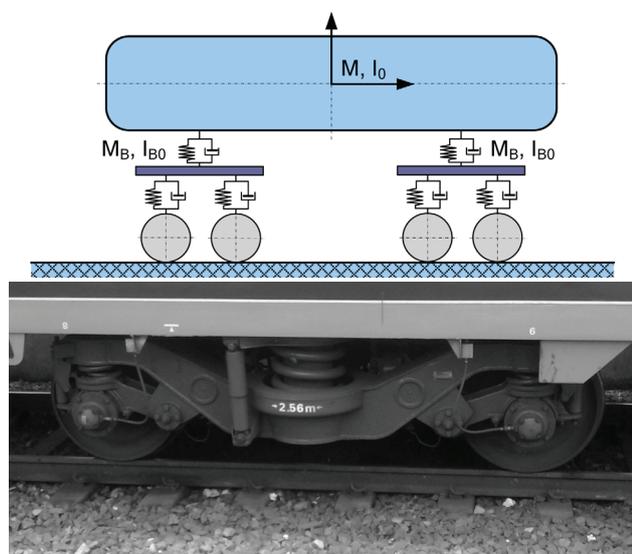


Figura 17 Representação esquemática do modelo utilizado nas análises dinâmicas usualmente realizadas para avaliação de conforto

Em geral, esta problemática (desconforto dos passageiros) é mais crítica para obras de vãos mais pequenos, pois existe uma maior aproximação entre a frequência fundamental de vibração do tabuleiro e a frequência da excitação (dependendo da distância entre eixos e da velocidade de circulação do comboio).

No que se refere à análise modal da ponte, os modos de vibração do tabuleiro da ponte, nomeadamente em flexão e torção, apresentavam frequências de 0,31 Hz e 0,99 Hz, respectivamente. Essa relação de frequências da ordem de 3 foi um bom indicativo para

a análise de estabilidade aerodinâmica – estabilidade por flutter em modo interactivo de flexão- torção. Os coeficientes aerodinâmicos de arrastamento C_D , de sustentação C_L e de Momento C_M para diferentes ângulos de ataque α do vento com o plano horizontal foram analisados experimentalmente assim como a estabilidade aerodinâmica do tabuleiro. Essa análise foi feita num modelo seccional à escala 1/70 no LNEC. Os coeficientes encontram-se apresentados na Figura 18.

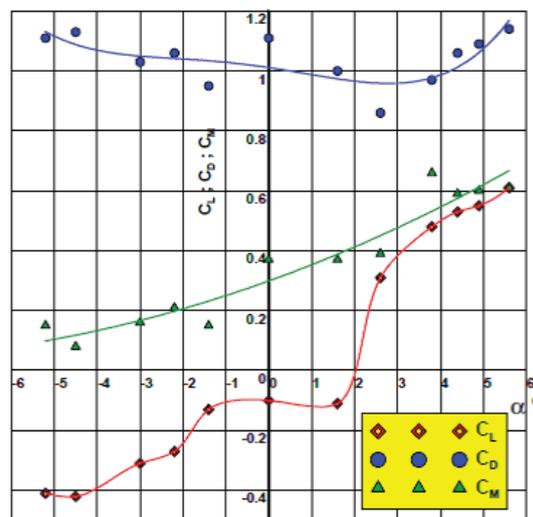


Figura 18 TTT – Coeficientes aerodinâmicos determinados através de ensaios realizados no LNEC (1/70)

4 Suspensão em tabuleiros ferroviários

4.1 Aspectos de concepção

Nas pontes de tirantes ferroviárias com via dupla, a suspensão lateral é mais simples de introduzir admitindo que as vias são centradas no tabuleiro. Se a suspensão for axial (um só plano de tirantes) ou a plataforma ferroviária for descentrada, é necessário aumentar a entrvia para poder acomodar as ancoragens dos tirantes e guardar as necessárias distâncias de segurança. Admite-se, como excepção, o caso dos tabuleiros com directriz curva onde é possível adoptar uma suspensão com um só plano de tirantes excêntrico. Foi essa a solução que adoptámos num dos estudos recentes feitos para o concurso da nova Ponte do Metropolitano no Porto – Figura 19.

Para esta obra estudamos também como opção alternativa, uma solução a dois níveis com tabuleiro superior para peões e vias cicláveis e tabuleiro inferior para o Metropolitano. O tabuleiro era uma treliça mista tipo Warren, em que o tabuleiro inferior ferroviário entrava em túnel na encosta da margem direita do Douro (eliminando os problemas de impacto ambiental) enquanto o tabuleiro superior se integrava naturalmente na encosta com os respectivos acessos pedonais e cicláveis. A Figura 20 mostra uma fotomontagem desta opção.

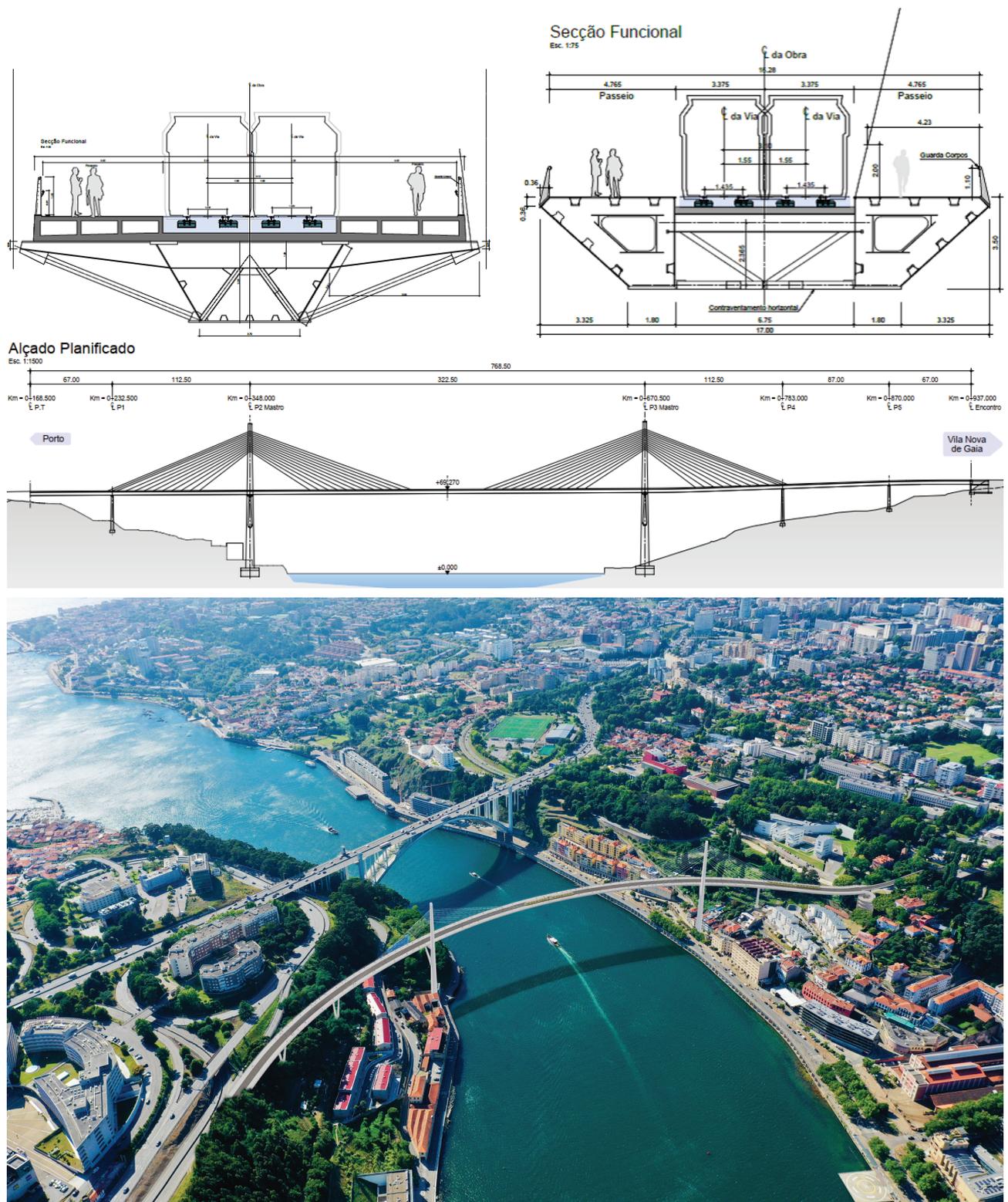


Figura 19 Estudo de concurso da nova ponte ferroviária para o Metropolitano do Porto, com tabuleiro em curva com $R = 500$ m e um vão principal $L = 322,5$ m. Solução de tabuleiro a um só nível e com um plano de tirantes



Figura 20 Estudo de concurso da nova ponte ferroviária para o Metropolitano do Porto, com tabuleiro em curva com $R = 500$ m e um vão principal $L = 322,5$ m. Solução de tabuleiro a dois níveis e com dois planos de tirantes

4.2 Aspectos específicos de pontes em “bowstring”

A suspensão axial pode ser adoptada em pontes ferroviárias em “bowstring”, conforme fizemos em duas realizações – a Ponte sobre o Rio Sado em Portugal e recentemente no Viaduto Essalam na linha de Metro Rabat – Salé em Marrocos. Ambas as obras têm um tabuleiro em caixão unicelular, um único arco metálico superior que suspende ao longo do seu eixo o tabuleiro. A ponte sobre o Rio Sado, que é actualmente a ponte ferroviária portuguesa mais longa, com cerca de 3 km de comprimento (2734,75 m), tem vãos tipo de 45 m e vãos principais de 160 m sobre o rio realizados com um tabuleiro misto em caixão com 2,6 m de altura, em viga contínua com 480 m de comprimento entre juntas de dilatação com os viadutos de acesso norte e sul.



Figura 21 Ponte sobre o rio Sado em Alcácer do Sal, em “bowstring” e vãos de 160 m

O tabuleiro da ponte é totalmente contínuo ao longo dos 3×160 m = 480 m sobre os apoios intermédios, incluindo o arco. Na Figura 23 apresenta-se um tramo de extremidade, no qual as flechas sob acção das sobrecargas ferroviárias tendem a ser maiores. A flecha máxima é 120 mm, equivalente a $1/1333$ do vão sob a acção de um comboio regulamentar LM71. Um aspecto interessante para este tipo de concepção é a relação das frequências mais baixas

de flexão e torção do tabuleiro. No caso da Ponte do Sado esses valores são respectivamente de 0,55 Hz em flexão e de 0,44 Hz em torção. A frequência de torção numa solução de suspensão axial não é influenciada pelos tirantes e corresponde essencialmente à frequência de um modo de torção de uma viga caixão com um vão de 160 m e encastrada nas extremidades. Este aspecto da suspensão axial em pontes de tirantes e em “bowstring” é discutido em [2].

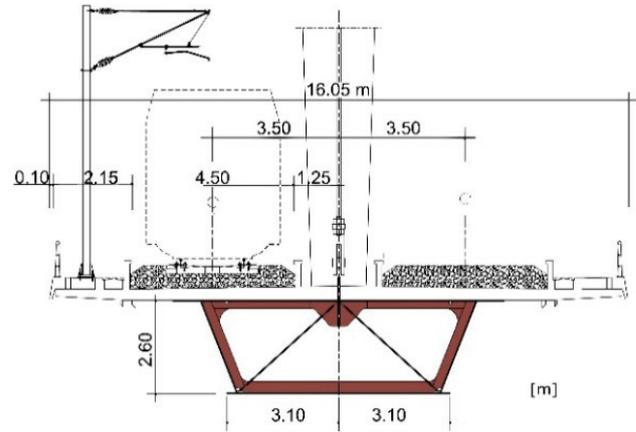


Figura 22 Secção transversal do tabuleiro da Ponte sobre o rio Sado em Alcácer do Sal



Figura 23 Tramo extremo sul do “Bowstring” da Ponte sobre o Sado

Ao obter-se uma frequência de torção mais elevada do que a frequência de flexão faz com que do ponto de vista de estabilidade aerodinâmica o modo de “stall flutter” (flutter torsional) passe a ser o modo crítico ao contrario do que sucederia numa ponte de tirantes. Efectivamente o flutter clássico, ou seja, com interacção dos modos de flexão e torção deixa ser o modo crítico o que facilmente se compreende pela formula básica devida a Selberg, para a velocidade critica da placa fina ideal:

$$v_{cr,F,placa\ final\ ideal} = 3,7 B f_T \sqrt{\frac{mr}{\rho B^3} \left[1 - \left(\frac{f_F}{f_T} \right)^2 \right]}$$

em que:

- $r = \sqrt{(I_p/m)}$ – raio polar de giração mássico;
- f_T e f_F – frequências dos modos de torção e flexão;
- m – massa/unidade de comprimento do tabuleiro;
- B – largura do tabuleiro;
- ρ – massa especifica do ar ($1,25$ kg/m³).



PORMENOR : Esquema de princípio para as rótulas

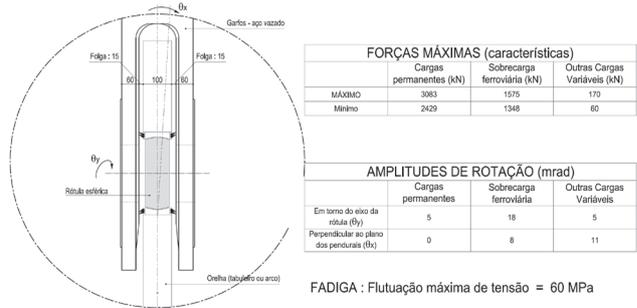


Figura 24 Rotulas esféricas na ligação dos pendurais ao tabuleiro na Ponte do Sado Vista em alçado antes da ligação por cavilha, pormenor da rotula e especificações de projecto para as rótulas

Para um tabuleiro real (e não para a placa fina ideal) tem-se:

$$V_{cr,F} = \eta \times V_{cr,F,placa\ fina\ ideal}$$

em que o coeficiente $\eta < 1,0$ depende da geometria da secção [2], sendo unitário ($\eta = 1,0$) para o caso de placa fina ideal. A fórmula de Selberg dá boas aproximações da velocidade crítica para $f_T > 1,5 \times f_p$ e um decremento logarítmico do amortecimento estrutural superior a 5%. Se a fórmula fosse aplicada no caso de $f_T < f_p$, a mesma fórmula conduziria a velocidades críticas fora do domínio real, o que obviamente não tem sentido. Importa referir que

no caso $f_T = f_p$ a velocidade crítica seria nula. Para o caso do tabuleiro da ponte sobre o Sado, o modo crítico de instabilidade aerodinâmica é o modo de flutter torsional (Stall Flutter), cuja velocidade crítica pode ser estimada por [2]:

$$V_{cr,SF} = \tau f_T B$$

em que τ é um coeficiente que depende da geometria da secção mas que, no presente caso, é superior a 9,0. Assim para $f_T = 0,44\text{Hz}$ e $B = 15,7\text{ m}$, obteve-se para uma velocidade média crítica superior a 62m/s (224 km/h).

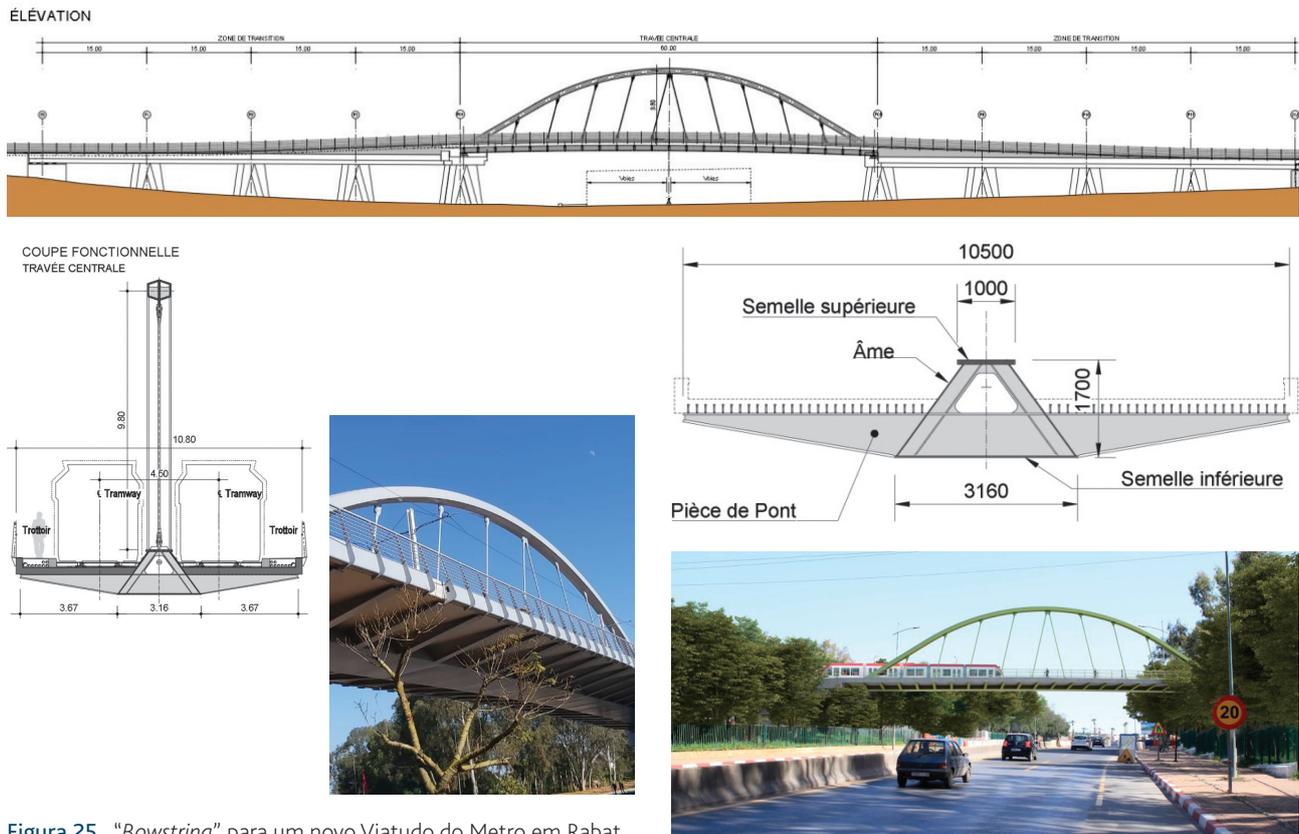


Figura 25 "Bowstring" para um novo Viatudo do Metro em Rabat

Um aspecto específico das pontes em “*bowstring*” com suspensão axial consiste no modo como podem ser absorvidas as rotações de torção do tabuleiro que vão induzir uma flexão localizada na parte inferior dos pendurais. Na Ponte sobre o Rio Sado, os pendurais são constituídos por barras com 200 mm de diâmetro em aço S355 NL. As ancoragens são compostas por peças em aço vazado e a ligação é feita com rótulas esféricas (rótulas em ambas as direcções) de modo a prevenir problemas de fadiga na ligação dos pendurais com o tabuleiro e com o arco – Figura 24.

Deve dizer-se que, mesmo para pontes em “*bowstring*” com suspensão axial concebidas para as sobrecargas do Metro, as rotações transversais de torção do tabuleiro sob sobrecargas ferroviárias excêntricas podem ser acomodadas pelo próprio sistema de ancoragem dos pendurais quando são sistemas de barras (HSS) com ancoragens prefabricadas tipo. Foi essa a solução que adoptámos no Viaduto Essalam em Rabat, já referido anteriormente. O vão principal deste viaduto é de 60 m, enviesado em relação à autoestrada, e a superestrutura é um caixão, com nervuras transversais, com 1,7 m de altura.

O comprimento total do viaduto é de 480 m. Os pendurais são constituídos por barras de diâmetro 100 mm em aço S460. As ancoragens são peças *standard* do próprio sistema de pendurais que conseguem acomodar, com a resistência à fadiga necessária, as rotações transversais induzidas pela torção do tabuleiro.

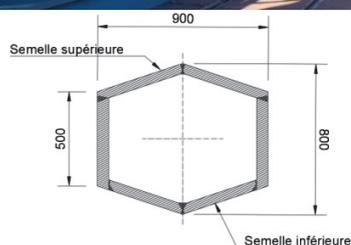


Figura 26 Suspensão axial e secção do arco no novo viaduto em “*bowstring*” do Metro em Rabat

Por razões de limitação do gabarito vertical sobre a autoestrada, esta obra tem um tabuleiro em certa medida inovador, com caixão central invertido e consolas laterais que constituem nervuras transversais para a laje de tabuleiro em funcionamento misto com o caixão. O arco com secção transversal hexagonal (900 mm de largura por 800 mm de altura) é rigidamente ligado à superestrutura nas secções de extremidade suportadas pelos pilares principais. A espessura das chapas do arco é variável entre 50 e 60 mm nos banzos superiores e inferior e constante de 60 mm nas almas.

O arco realiza uma suspensão axial conforme se mostra na Figura 26 e à semelhança da Ponte sobre o Sado, tem uma secção tubular hexagonal para garantir a sua estabilidade transversal.

5 Pontes ferroviárias com pré-esforço extradorsal

5.1 Descrição geral

A solução estrutural de pontes com pré-esforço extradorsal foi estabelecida e aplicada por Mathivat em 1988 quando, nessa altura, propôs esta solução em fase de concurso para o Viaducto de l'Arrêt-Darré. A solução caracterizava-se pela adopção de pré-esforço exterior (fora da secção transversal do tabuleiro) nas secções de apoio, permitindo ter maiores excentricidades nos cabos de pré-esforço e, por isso, maior eficiência [9]. Na Figura 27 é apresentada uma imagem de uma ponte na Polónia com este tipo de solução.



Figura 27 Vista de ponte KST em Cracóvia [10]

A solução passou a ser conhecida por ser idêntica à solução de pontes de tirantes, diferindo essencialmente no facto de ter mastros baixos (0,10 a 0,15 do comprimento do vão) e, por conseguinte, cabos de suspensão menos eficientes do que numa ponte de tirantes. Nas pontes com pré-esforço extradorsal, os cabos exteriores permitem compensar uma parte das cargas permanentes. Estão, no entanto, sujeitos a uma variação menor de tensão induzida pelas sobrecargas, em comparação com a solução de pontes de tirantes. Esse facto, permite adoptar sistemas de ancoragem diferentes dos sistemas adotados em pontes de tirantes, que, nestas últimas, são essencialmente condicionados pela sua resistência à fadiga.

Este tipo de solução emergiu assim como uma nova tipologia de pontes para vão médios (dependendo do nível de sobrecarga, vãos máximos entre 100 m e 200 m), onde se passou a utilizar sistemas de cabos de pré-esforço no lugar de tirantes, sendo necessário então adoptar tabuleiros com secções menos esbeltas assim como mastros de menor altura (em comparação com as pontes de tirantes). A principal diferença em relação às pontes de tirantes é o facto dos cabos das pontes de pré-esforço extradorsal serem menos condicionados por efeito de fadiga no aço que compõem os cordões.

Independentemente de se tratar de uma ponte de tirantes ou uma ponte com pré-esforço extradorsal, quanto maior partido se tirar dos tirantes/cabos, maior será a esbelteza do tabuleiro. Por outro lado, maior será a variação de tensão devida à sobrecarga e mais exigente será o dimensionamento das diversas componentes do sistema relativamente à resistência à fadiga. Relativamente ao tipo de suspensão, estando dependente da secção funcional do tabuleiro e da solução estrutural definida para o mesmo, e tendo impacto na geometria do pilar e mastro(s), poderão ser adotados sistemas de suspensão central, lateral ou híbrido, à semelhança do que se passa com as pontes de tirantes.

A forma mais fácil de compreender o comportamento de obras com esta solução estrutural passa por compará-la com outros tipos de solução estrutural de pontes bem conhecidas e amplamente estudadas. O comportamento das pontes com este tipo de solução estrutural fica assim entre uma solução de viga contínua de betão armado pré-esforçado e uma solução de ponte atirantada. Numa solução de viga contínua, as cargas são transmitidas às fundações através de corte e flexão no tabuleiro enquanto que, numa solução de ponte de tirantes, as cargas são transmitidas às fundações, total ou parcialmente, através da força de tracção nos tirantes (suspensão). A solução de pré-esforço extradorsal enquadra-se entre estas soluções pois a forma de transmissão das cargas aos apoios é mista – parte é transmitida por corte e flexão do tabuleiro e uma parte é transmitida através dos cabos de pré-esforço.

Tabela 1 Comparação das soluções estruturais

	Tipologia		
	Pontes em viga contínua	Pontes com pré-esforço extradorsal	Ponte de tirantes
Equilíbrio das cargas permanentes	Pré-esforço interior	Sistema misto (pré-esforço interior + tirantes)	Tirantes
Grau de equilíbrio das cargas permanentes	Cargas permanentes + parte das sobrecargas $g1 + g2 + \alpha (q + Q)$	Parte das cargas permanentes $K (g1 + g2)$	Cargas permanentes $g1 + g2$
Transferência de sobrecargas para fundações	Tabuleiro	Tabuleiro ^(***) Tirantes ^(*)	Tabuleiro ^(*) Tirantes ^(***)
Fadiga	Não	Moderado (aço dos tirantes)	Sim (aço dos tirantes e ancoragens)
Esbelteza do tabuleiro	Pequena	Intermédio	Grande
Método construtivo por avanços sucessivos	Pré-esforço interior	Misto (pré-esforço interior + tirantes)	Tirantes

* Pouco influente
 ** Influente
 *** Muito influente

Excluindo a influência favorável dos cabos de pré-esforço extradorsal, existem semelhanças evidentes deste tipo de pontes com as pontes em betão armado pré-esforçado construídas por avanços sucessivos:

- **Secção transversal:** embora seja função dos vãos e do nível de sobrecarga actuante, a secção transversal mais corrente em pontes de pré-esforço extradorsal consiste em secções em caixão. No que se refere à esbelteza das secções, por apresentar um comportamento misto, o valor situa-se naturalmente entre a esbelteza de uma ponte em viga-caixão contínua e uma ponte de tirantes [11].



Figura 28 Exemplo de uma ponte com pré-esforço extradorsal com secção transversal em caixão [12]

- **Processo construtivo:** em pontes construídas por avanços sucessivos de grande vão e que, por isso, requerem secções em caixão de grande envergadura para resistir a momentos negativos durante a fase construtiva, por questões arquitectónicas e económicas, já se recorreu a soluções de sistemas de atirantamento provisório, nos quais os tirantes/cabos provisórios vão sendo ancorados durante a execução de aduelas. Esses tirantes/cabos permitem reduzir o momento negativo no apoio durante a fase construtiva, aumentar a esbelteza do tabuleiro e são, em geral, desinstalados após assegurada a continuidade do tabuleiro. A diferença entre estas duas tipologias de pontes passa assim por converter esses tirantes/cabos em elementos definitivos, tal como fez Finsterwalder em 1967, aquando do concurso para a Gran Belt Bridge [9].
- **Quantidades de pré-esforço:** tal como a esbelteza, a quantidade de pré-esforço em pontes com pré-esforço extradorsal está compreendida entre a quantidade de pré-esforço em viga-caixão tradicional e a quantidade em pontes de tirantes [11].

5.2 Critérios de dimensionamento

Os diversos estudos e ensaios realizados sobre obras com este tipo de solução estrutural permitiram definir desde já alguns critérios de dimensionamento, nomeadamente:

- Para que o primeiro tirante (do lado do meio vão) do sistema em harpa seja eficaz, este deverá localizar-se a uma distância compreendida entre 0,18 e 0,25 do vão principal, medida em relação ao pilar [9];

- No caso de a ponte ser construída por avanços sucessivos, a distância entre os cabos de pré-esforço extradorsal deverá ser igual ao comprimento das aduelas definidas no processo construtivo, de modo a compensar uma parcela do seu peso próprio [9];
- Embora Mathivat tenha utilizado maioritariamente tabuleiros com esbeltezas constantes ($L/h = 35$), a solução com tabuleiros de altura variável tem se demonstrado competitiva ($L/h_{vão} = 45$; $h_{apoio}/h_{vão} = 15$) [9];
- Para que a fadiga não seja crítica no comportamento/vida útil dos cabos de pré-esforço, a variação de tensão induzida pelas sobrecargas nos cordões não deverá ser superior a 80 MPa e, para além disso, a tensão característica nos mesmos deverá ser limitada a $0,60 f_{GUTS}$ [9], em que f_{GUTS} corresponde à tensão resistente última garantida do aço a utilizar nos tirantes;
- No sentido de não se ultrapassar o valor da variação de tensão nos cordões devida à acção da sobrecarga indicada no ponto anterior (80 MPa), recomenda-se que os mastros sejam definidos com uma altura igual a 0,10 do vão principal [9];
- Uma vez que não se compensa a totalidade da carga permanente com o sistema de pré-esforço extradorsal, torna-se necessário definir um plano de contraflechas que permita compensar as flechas do tabuleiro ao longo da construção, mas também as flechas a longo prazo devidas à fluência no betão [9].

5.3 Utilização e realizações

Embora até aqui tenha sido abordado o conceito de pontes com pré-esforço extradorsal no sentido geral, dada a importância das sobrecargas regulamentares no dimensionamento de obras-de-arte e também ao nível dos critérios de verificação de segurança, o número de pontes ferroviárias concebidas e construídas recorrendo a esta solução estrutural é ainda muito reduzido (em comparação com o número total de pontes ferroviárias com tabuleiro suspenso). Existem quase uma centena de pontes com pré-esforço extradorsal em todo o mundo e uma delas encontra-se localizada em Portugal – Ponte dos Socorridos, construída em 1994 na região da Madeira e projectada por A. Reis e A. Pereira.

De acordo com [13], as pontes com pré-esforço extradorsal destinadas exclusivamente a tráfego ferroviário foram construídas no Japão - Hirano Bridge, Natorigawa Bridge, Sannai-Maruyama Bridge e Yashiro Viaduct.

Existe depois um conjunto de obras que foram concebidas para suportarem uma sobrecarga equivalente a metro ligeiro (mais reduzida em comparação com a sobrecarga ferroviária convencional) – North Arm Bridge (Canadá), Moolchand Metro Bridge (India) e Plaszow Tramway Bridge (Polónia). Existem ainda duas outras pontes – Kazungula Bridge (Zâmbia) e Wuhu Bridge (China) – que são destinadas a tráfego rodoviário, embora esta última, por se tratar de uma ponte em treliça mista, vença um vão bastante desenquadrado da gama mencionada anteriormente – 312 m.



Figura 29 Ponte dos Socorridos, região autónoma da Madeira (Portugal)



Figura 30 Hirano Bridge, Osaka (Japão) [14]

A GRID International encontra-se neste momento a participar num projeto de uma ponte ferroviária com este tipo de solução estrutural. À data da publicação deste artigo, a obra encontra-se praticamente finalizada. Apesar do vão ser moderado (50 m), a solução adoptada para o tabuleiro é singular – tabuleiro em laje nervurada. A laje apresenta uma espessura média de 55 cm enquanto que as nervuras têm uma altura de 1,50 m. Nas figuras seguintes são apresentadas algumas imagens do estudo prévio que foi realizado. A opção por uma solução de pré-esforço extradorsal, foi fundamentalmente por razões estéticas e de necessidade de limitar a altura do tabuleiro em face dos condicionamentos de gabarito vertical sobre a autoestrada. Optou-se por uma suspensão em harpa, mastros em V invertido no plano transversal, rigidamente ligados ao tabuleiro a abrir no sentido ascendente. O tabuleiro funciona assim como uma viga continua apoiada nos pilares dos mastros, à semelhança do que já tínhamos adoptado na Ponte sobre o Rio Liz em Leiria [2].

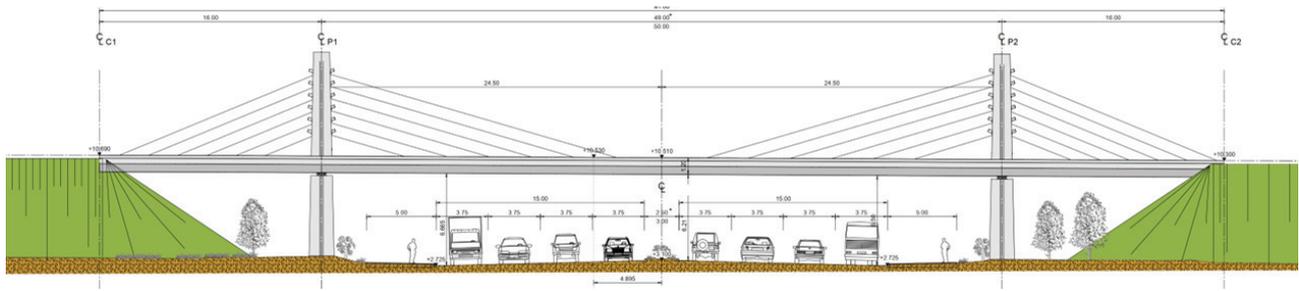


Figura 31 Alçado de uma ponte com pré-esforço extradorsal (projecto GRID – estudo prévio)

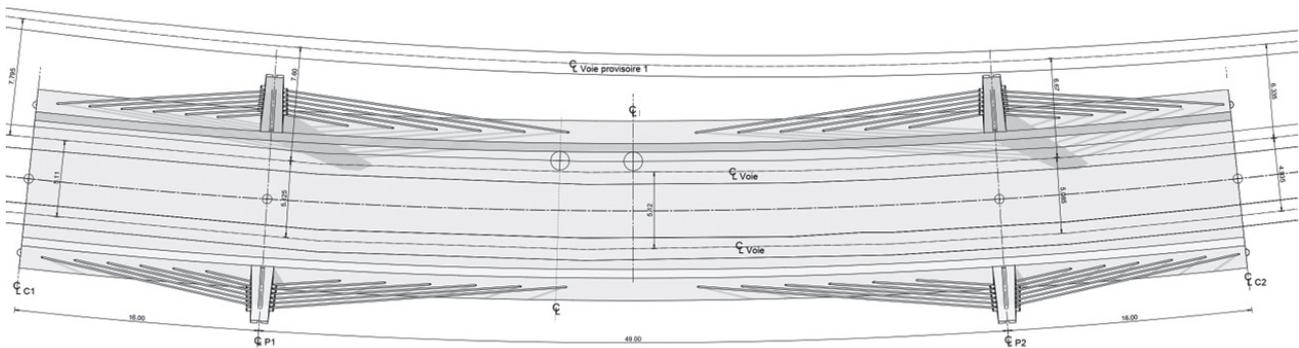


Figura 32 Vista em planta de uma ponte com pré-esforço extradorsal (projecto GRID – estudo prévio)

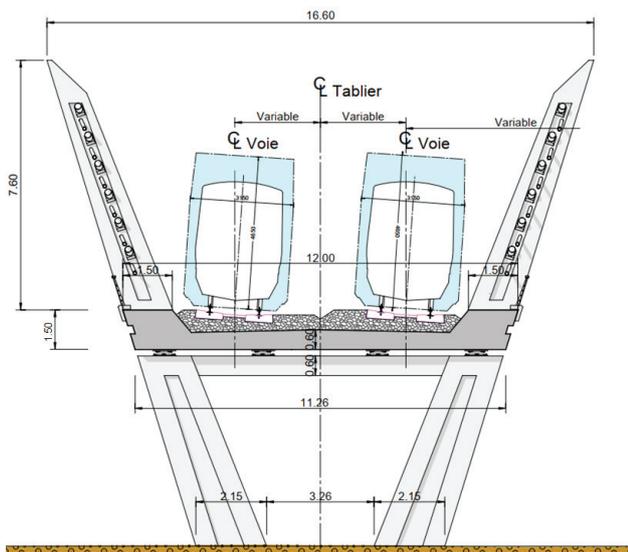


Figura 33 Secção transversal do tabuleiro e vistas dos pilares e mastros de uma ponte com pré-esforço extradorsal (projecto GRID – estudo prévio)

6 Conclusões

Neste artigo foram apresentados aspectos específicos das pontes de tirantes ou em "bowstring" ferroviárias, dando-se especial enfoque

ao dimensionamento e verificação de segurança. A solução de pontes com pré-esforço extradorsal foi igualmente abordada com maior enfoque. Foram apresentados alguns casos de estudo e realizações.

Os autores acreditam que as soluções estruturais apresentadas (pontes de tirantes, "bowstring" e pontes com pré-esforço extradorsal), irão certamente corresponder às mais importantes exigências na ferrovia em Portugal, para já, durante esta década.

Referências

- [1] Sítio web <https://www.portugal.gov.pt/> – "Programa Nacional de Investimentos – Anexo A.2: Antecedentes: PETI3+ 2014-20", 2020.
- [2] Reis, A.; Pedro, J.O. – "Bridge Design: Concepts and Analysis", Wiley, 2019, 552 p.
- [3] Simpósio IABSE – "Bridges: Interaction between construction technology and design", IABSE Report 64, 1991, Leningrado.
- [4] Gimsing, J. – "The Øresund Bridge: The tender project", Cable-Stayed Bridges – Past, Present and Future, 1999, pp. 427-434.
- [5] IABSE Conference Malmö – "Cable-Stayed Bridges – Past, Present and Future", Sweden, June 2-4, 1999.
- [6] Nussbaumer, A. et al. – "Fatigue Design of Steel and Composite Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-9 – Fatigue/Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, 2nd Edition", Wiley, 2018, 297 p.
- [7] Freyssinet – "The Yavuz Sultan Selim Bridge", Structure Magazine Special Issue, 2016, 31 p.

- [8] Li, H. – “Replacement of Cable Stays in Yonghe Bridge in Tianjin, China”, *Advances in Civil Engineering*, 2020, 17p.
- [9] Cho Cho, G.; Bengoechea, A.C.A – “El Puente con Pretensado Extradorsado. Un Nuevo tipo estructural”, *VIS Ingenierías*, 2002, Vol. 1, No. 1, Facultad de Ingenierías Fisiomecánicas, pp. 67-73.
- [10] Biliszczuk, J. et al. – “Extradorsed Bridges in Poland – Design and Construction”, *Frontiers in Built Environment*, 2017, Vol. 2, Article 37, 9 p.
- [11] Bárbara, M. – “Estudo de Pontes com Pré-esforço extradorsal”, *Dissertação de Mestrado*, 2011, Instituto Superior Técnico.
- [12] Pahuja, J. – “Spanning Bridges Using Extradorsed Cables”, *MIDAS Elite Engineer Talk*, 97p.
- [13] Sítio web <https://structurae.net/>, consultado em 2022.
- [14] Sítio web https://www.shimz.co.jp/en/works/jp_rail_200811_hirano.html, consultado em 2022.
- [15] Reis A. et al – “The steel design for the new railway bridge over the river Sado in Portugal”, *Steel Construction, Design and Research*, 2010, 3(4): 201-211.

