

PONTE INFANTE D. HENRIQUE

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

**ANTÓNIO
ADÃO DA FONSECA**
Professor Catedrático – FEUP
Engenheiro Civil

**PEDRO
FRADIQUE MORUJÃO**
Engenheiro Civil

**RENATO
OLIVEIRA BASTOS**
Engenheiro Civil

AFA – Consultores de Engenharia, SA - PORTO

**FRANCISCO
MILLANES MATO**
Professor Catedrático – ETSICCP
de Madrid – Engenheiro Civil

LUIS MATUTE RUBIO
Engenheiro Civil

**ARTURO CASTELLANO
ORTUÑO**
Engenheiro Civil

IDEAM, SA - MADRID

SUMÁRIO

Apresenta-se o projecto vencedor do concurso internacional para a concepção e construção da Ponte Infante D. Henrique, o qual está, actualmente, em execução. A Ponte consiste, fundamentalmente, num arco esbelto de grande abatimento que dá apoio a um tabuleiro de grande rigidez. Este conjunto possui características singulares quer na sua resposta estrutural quer na sua leitura estética. Descrevem-se os aspectos mais importantes relacionados com o funcionamento da estrutura e apresenta-se, resumidamente, a filosofia do traçado do pré-esforço da Ponte.

1. INTRODUÇÃO

O concurso da nova ponte a ser construída com o tabuleiro aproximadamente à mesma cota e a meio caminho entre a ponte Luiz I e a ponte D. Maria estimulava, de uma forma bem explícita, a uma concepção cujas qualidades técnicas e qualidades estéticas teriam de ombrear com as pontes existentes, qualquer delas grandes obras de Engenharia.

Os autores do projecto entenderam que tais qualidades teriam de se apresentar discretamente, sem aparato e sem adornos, e assim nasceu uma Ponte muito simples e neutra para a Cidade, sem que isso tenha significado renunciar a uma tecnologia de vanguarda. Uma Ponte que, sem apoiar-se no leito do rio Douro, sem apoiar-se sequer nas suas margens, voa como um pássaro de Gaia ao Porto, com uma grande limpeza e sensibilidade, expressando-se do modo mais puro possível. Uma estrutura que voa, quase musical, afastada tanto do convencional como do ornamental.

Um arco singular e esbeltíssimo, de grande vão, saindo de um modo natural e harmonioso das zonas altas e rochosas das encostas e dando apoio a um tabuleiro que tem no perfil do desenho uma força maior do que o arco (Figura 1).



Figura 1 - Perspectiva da Ponte vista da margem esquerda

Uma Ponte com um carácter geométrico muito peculiar, formado por grandes planos, tanto os arcos como os montantes, e pela grande viga do tabuleiro de secção constante. A estrutura é um conjunto de rectas e planos, não de elementos curvos, que afinal melhor corresponde ao antifunicular dos esforços e facilita o processo construtivo. Este aspecto levemente quebrado, além de ser mais funcional, dá à Ponte uma personalidade muito especial.

Não há nada nesta Ponte que seja acrescentado decorativamente. Não há nada que não responda às exigências funcionais. Tudo tem um sentido ao mesmo tempo estrutural e funcional. Por isso tem a virtude da simplicidade, a pureza estrutural e a regularidade geométrica.

A Ponte em construção acentuará uma imagem de leveza na interligação entre as margens, assumindo a simplicidade que o local lhe confere e a humildade de forma que as margens lhe solicitam (Figura 2).



Figura 2 – Alçado da Ponte vista do tabuleiro inferior da ponte Luis I

2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A Ponte com o nome de *Infante D. Henrique*, sem dúvida um dos mais ilustres filhos da cidade do Porto e de Portugal, é constituída por dois elementos fundamentais em interacção mútua: uma viga caixão, relativamente rígida, em betão armado pré-esforçado de 4,50 m de altura, apoiada sobre um arco flexível em betão armado com 1,50 m de espessura.

O vão entre arranques do arco é de 280 m e a flecha entre o fecho e os arranques é de 25 m, numa relação superior a 11/1 (Figura 3).

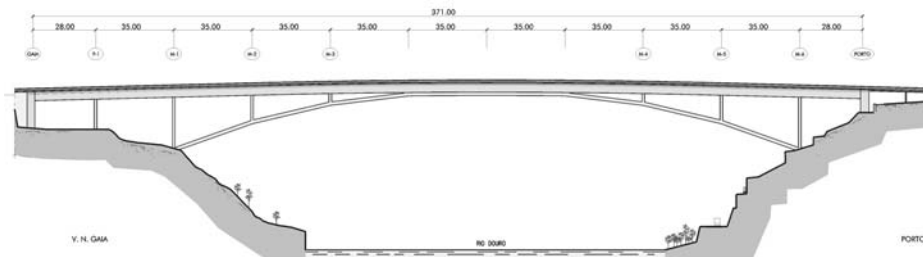


Figura 3 – Alçado geral da Ponte

Nos 70 m centrais da estrutura, o arco une-se estruturalmente ao tabuleiro formando uma secção em caixão com 6 m de altura cujas faces laterais apresentam um recorte que mantém a continuidade formal dos volumes correspondentes ao tabuleiro e ao arco (Figura 4).

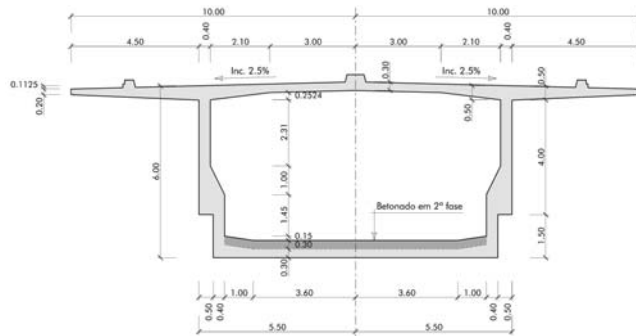


Figura 4 – Secção transversal no tramo central

Deste modo, o comportamento da estrutura é determinado pela relação que se estabelece entre dois elementos de rigidez tão desigual no conjunto arco-tabuleiro. A Ponte afasta-se da concepção clássica de um arco em que, trabalhando este basicamente à compressão, liberta de flexões o tabuleiro ou reduz as flexões apenas à distância entre montantes.

Neste caso, a grande rigidez do tabuleiro face ao arco, aliada ao forte abatimento deste, aproxima mais o funcionamento da estrutura ao de uma ponte com o tabuleiro rígido, onde é a viga-caixão que vence o vão completamente por flexão, tal como numa ponte contínua convencional, mas proporcionando o arco vários apoios elásticos através de montantes afastados de 35 m entre si.

Este grande abatimento encontra-se claramente fora do âmbito aconselhável das pontes em arco, que oscila entre 1/5 e 1/10. Como é sabido, abaixo destes limites incrementam-se de forma rápida os esforços axiais do arco, assim como as flexões sob o efeito das cargas móveis, dos possíveis assentamentos diferenciais e dos efeitos térmicos e reológicos, que podem chegar a produzir diminuições importantes da flecha do arco e a proporcionar a aparição de efeitos hiperestáticos por deformações de 2ª ordem não desprezáveis.

O arco, de altura constante, responde ao incremento de esforços axiais do fecho até aos arranques recorrendo a um aumento da largura da sua secção, cuja projecção em planta segue um contorno poligonal desde os 10 m no tramo central até alcançar os 20 m nas nascenças. Os dois primeiros tramos do arco, dada a sua grande largura, contêm aligeiramentos interiores com o intuito de reduzir o seu peso próprio, que penalizaria a quantidade de pré-esforço do tabuleiro e a flexão devida ao peso próprio do arco durante os avanços em consola, na sua construção (Figura 5).

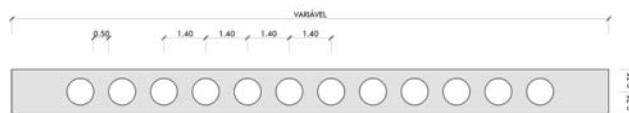


Figura 5 – Secção transversal do arco aligeirado

3. ANÁLISE DA RESPOSTA ESTRUTURAL DA PONTE

A resposta estrutural do conjunto “arco flexível - tabuleiro rígido” tem as características fundamentais seguintes:

- exceptuando as inevitáveis flexões de compatibilidade nos arranques encastrados, ausência de flexões importantes no arco, consequência da sua pequena rigidez; a perda de flecha devida às acções térmicas e reológicas são controladas e distribuídas pela rigidez do tabuleiro, assim impedindo que aquela perda de flecha alcance valores importantes e portanto garantindo que as variações de esforços axiais no arco são relativamente moderadas;
- o tabuleiro apresenta um comportamento de viga contínua sobre apoios elásticos afastados de 35 m; a contribuição do tabuleiro na resistência às cargas verticais aplicadas é de cerca de 15% para as acções permanentes e sobrecargas simétricas, percentagem que aumenta sensivelmente no caso de sobrecargas assimétricas, assim evitando a aparição das habituais flexões elevadas neste tipo de sollicitação, cujo antifunicular se afasta da forma do arco;
- na união arco-tabuleiro, a excentricidade entre a directriz do arco e a do caixão do tramo central de 70 m impõe uma flexão negativa localizada que é muito elevada e assim elimina praticamente as flexões positivas no referido tramo central, mantendo-o em compressão composta nas envolventes de sobrecarga mais desfavoráveis e permitindo eliminar completamente o pré-esforço definitivo nesse tramo; no entanto, a compatibilidade na zona do tabuleiro adjacente faz aumentar as flexões positivas nas secções que antecedem a união arco-tabuleiro.

Na verdade, a adopção de uma única secção em caixão nos 70 m centrais, que “aglutina” rigidamente o arco com o tabuleiro, otimiza a estrutura. Com efeito, o peso próprio por metro dos elementos estruturais nesta zona é cerca de metade do peso próprio por metro no resto da Ponte, em que o tabuleiro e o arco estão separados.

Fora daquele tramo central, o conjunto tabuleiro / arco separa as funções de “área do arco” à compressão e “inércia do tabuleiro” à flexão. Mas ao tirar partido da área do caixão do tramo central, de que normalmente só é aproveitada a sua inércia, consegue-se realizar o vão central de 70 m sem recurso a pré-esforço definitivo.

Mais, comprimir fortemente o banzo inferior do caixão à entrada do tramo central implica a introdução de grandes momentos negativos que se mantém com esse mesmo sinal ao longo desse tramo e portanto significa que a curvatura convexa do tramo central contraria as deformações ocorridas na restante parte da estrutura (Figura 6).

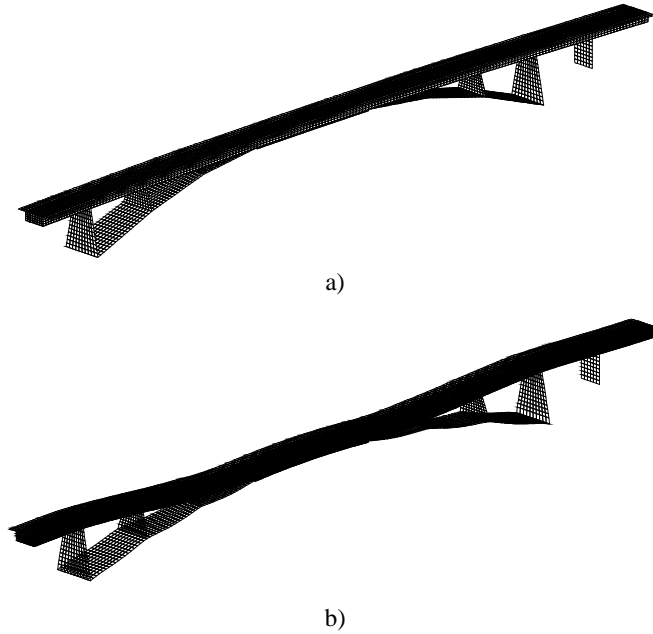


Figura 6: Modelo de elementos finitos de casca
a) sem acções gravíticas
b) com acções gravíticas

4. PRÉ-ESFORÇO

O traçado dos cabos de pré-esforço é recto para todas as famílias de cabos, estando todas elas localizadas no tabuleiro. Esta opção é a correcta face ao processo construtivo adoptado (avanços em consola, quer do tabuleiro quer do arco, de facto em simultâneo mas com o arco suspenso do tabuleiro), o qual sugere o uso da máxima excentricidade negativa para o pré-esforço "de montagem", e, portanto, o alojamento dos cabos na laje superior do tabuleiro; é também correcta face à condicionante de as almas estarem ocupadas pelas diagonais provisórias de triangulação tabuleiro-arco.

Sendo assim, existem dois tipos de famílias de pré-esforço - famílias "S", alojadas no banzo superior do caixão, e famílias "I", alojadas no banzo inferior do caixão. A colocação e tensionamento das diferentes famílias de pré-esforço foi criteriosamente estudada de modo a controlar as tensões no tabuleiro ao longo de todas as fases construtivas.

Durante a execução da estrutura, antes do fecho do arco, predominam os momentos negativos na viga-caixão. Assim, grande parte do pré-esforço negativo vai sendo colocado com o avanço das consolas.

Após o fecho do arco, coloca-se o pré-esforço final já sobre a estrutura "fechada", sendo essencialmente constituído por famílias de cabos situados no banzo inferior do caixão, entre os montantes M3 ou M4 e as uniões tabuleiro-arco dos lados correspondentes.

Utiliza-se pré-esforço provisório, sempre no banzo superior, em três situações distintas:

- para construir em consola o tramo central da Ponte, tramo este que em fase definitiva fica fortemente comprimido;
- para construir em consola a zona antes da união arco-tabuleiro, à qual corresponde, em fase definitiva, o momento máximo positivo;
- para fazer face ao elevado momento negativo sobre os pilares provisórios.

A Figura 7 mostra que o diagrama de momentos flectores no tabuleiro da Ponte construída por fases (acumulado de fases) apresenta uma translação no sentido dos momentos negativos em comparação com o correspondente à estrutura que fosse executada de uma só vez (estrutura cimbrada).

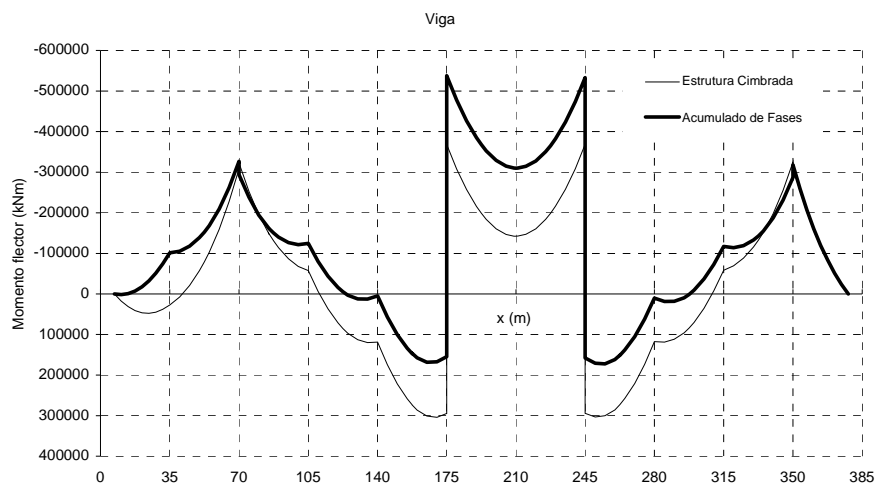


Figura 7 – Comparação dos diagramas de momentos flectores

À primeira vista, esta diferença é especialmente inconveniente no tramo central da estrutura, onde por efeito da elevada compressão excêntrica vinda do arco se geram momentos negativos muito elevados. O banzo inferior da secção em caixão ficaria então sujeito a tensões de compressão que não seriam admissíveis. Mas a “centralização” daquela compressão não pode ser conseguida à custa de pré-esforço na própria secção, dado que o pré-esforço em secções tubulares é pouco eficiente para contrariar as compressões nas fibras opostas à dos cabos. Pelo contrário, se forem de sinal favorável, os efeitos hiperestáticos do pré-esforço das famílias de

cabos presentes na restante estrutura podem conseguir baixar com sucesso as tensões de compressão no banzo inferior do tramo central, pois aos efeitos hiperestáticos correspondem esforços de flexão importantes e esforços axiais desprezáveis. Ora, no caso presente, as tensões induzidas por tais efeitos hiperestáticos são precisamente de sentido contrário às tensões geradas pelas restantes acções.

Observando a Figura 8, que apresenta o diagrama dos coeficientes de influência* da secção de momento flector negativo máximo do tramo central (junto à união arco-tabuleiro), determinam-se quais os cabos de pré-esforço mais eficazes para controlar as tensões nessa secção.

O pré-esforço positivo entre os montantes M3 ou M4 e a correspondente união arco-tabuleiro surge como o mais favorável para o efeito pretendido, mas também se constata que a retirada do pré-esforço negativo utilizado na execução das consolas do tramo central por avanços sucessivos provoca um importante momento hiperestático de sinal positivo. Assim, é pelo somatório destes dois efeitos que se atingem os objectivos pretendidos.

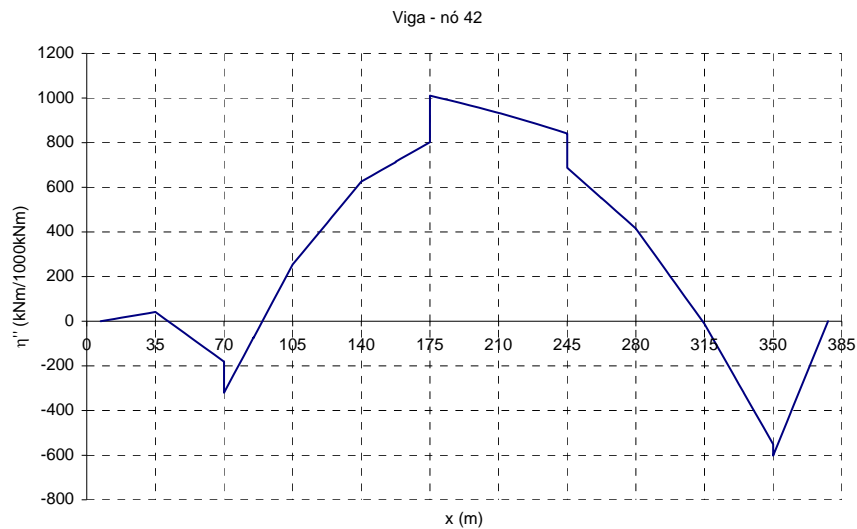


Figura 8 – Linha dos coeficientes de influência do nó 42 do tramo central

* - Define-se coeficiente de influência (η''_M) em j como sendo o momento flector hiperestático M na secção i devido a uma força unitária ($P=1$) de pré-esforço aplicada com uma excentricidade unitária ($e=1$) ao longo de um elemento de comprimento unitário ($l=1$) em j . Assim sendo, o momento hiperestático total do pré-esforço é dado por (1):

$$M = \int_0^L P(x)e(x)\eta''_M dx \quad (1)$$

5. AGRADECIMENTOS

Este texto contém extractos dos documentos que descrevem os cálculos do projecto da Ponte Infante D. Henrique, neles tendo colaborado todos os elementos da equipa projectista. Mas agradecimentos são também devidos a todos os colegas da AFAssociados e da IDEAM pela contribuição nas discussões onde se encontraram muitas das soluções aqui apresentadas.