

PROJECTOS E OBRAS
**BIBLIOTECA CENTRAL E ARQUIVO
MUNICIPAL DE LISBOA**
ESCAVAÇÃO E CONTENÇÃO PERIFÉRICA

RECONSTRUÇÃO DA PONTE
PÊNSEL ENTRE AS RIBEIRAS DO
PORTO E GAIA

ENTREVISTA
**RICARDO
OLIVEIRA**
UMA TRANSIÇÃO
NA CONTINUIDADE

38-43



PROJECTO E OBRAS

RECONSTRUÇÃO DA PONTE PÊNsil ENTRE AS RIBEIRAS DO PORTO E GAIA

A ACTUAL TRAVESSIA PEDONAL ENTRE AS ZONAS HISTÓRICAS DE PORTO E GAIA, EFECTUADA PELO TABULEIRO INFERIOR DA PONTE LUIZ I, NÃO PERMITE QUE OS PEÕES POSSAM USUFRUIR EM PLENA SEGURANÇA DA MAGNÍFICA PAISAGEM QUE DALI SE PODE DESFRUTAR. CONSTRUIR UMA NOVA TRAVESSIA EXCLUSIVA PARA PEÕES E TRÁFEGO DE BICICLETAS FOI O DESAFIO COLOCADO A TRÊS FINALISTAS DE ENGENHARIA CIVIL DA FEUP. O PROJECTO EFECTUADO FOI RECENTEMENTE DISTINGUIDO COMO PRÉMIO SECIL UNIVERSIDADES 2006.

TEXTOS, FOTOS E IMAGENS ÁLVARO AZEVEDO, ANTÓNIO PEDRO BRAGA, HUGO PINTO E JOANA TEIXEIRA

Entre as zonas históricas das cidades do Porto e Gaia, a travessia de peões sobre o rio Douro é presentemente efectuada pelo tabuleiro inferior da Ponte Luiz I. A atribuição do tabuleiro superior à passagem exclusiva do metro ligeiro veio adensar o tráfego automóvel à cota baixa e assim dificultar ainda mais a travessia pedonal, que é presentemente efectuada por estreitos passeios que não comportam o número de peões que os utiliza. Esta insuficiência provoca mesmo situações de perigo devido à frequente utilização pedonal da própria faixa rodoviária. Mesmo no caso em que os peões se mantêm sobre os passeios, é assustadora a proximidade entre os apêndices rígidos dos veículos pesados e os frágeis corpos que procuram rapidamente a outra margem sem poderem calmamente apreciar a magnífica paisagem que lhes é oferecida (figura 1). As possíveis soluções para este problema são as seguintes: proibir o tráfego rodoviário pelo tabuleiro inferior da Ponte Luiz I, proibir a sua utilização por peões ou construir uma nova travessia entre as duas margens. A motivação do trabalho aqui apresentado é a última das três alternativas.

BREVE HISTÓRIA DA PONTE PÊNSIL

Até meados do século XIX a cidade do Porto foi servida por uma ponte constituída por um conjunto de barcas que servia de suporte a um estrada sobre o qual circulavam peões e veículos de tracção animal. Esta ponte tinha de ser desmontada aquando da ocorrência de cheias no rio Douro e depois reconstruída mal as águas regressassem à sua cota habitual. O célebre desastre causado por uma das invasões francesas veio contribuir definitivamente para a decisão de construir uma nova ponte, moderna na altura, e que se situava a uma cota elevada relativamente ao nível das cheias, podendo assim constituir uma ligação permanente e segura entre as duas margens. Apesar de ter a designação oficial de Ponte D. Maria II, foi sempre conhecida pela designação de "Ponte Pênsil" (figura 2). Esta ponte foi construída entre 1841 e 1843, tendo sido destruída em 1887, quando deixou de ser necessária devido à abertura ao tráfego da Ponte Luiz I, que ainda hoje permanece em funções apesar dos seus cerca de 120 anos. Na figura 3 [1] encontra-se uma fotografia de 1887, que mostra as duas pontes, lado a lado, no único ano em que coexistiram. A Ponte Pênsil do século XIX foi projectada pelo engenheiro francês Stanislas Bigot, sendo constituída por cabos de suspensão em aço apoiados em obeliscos de pedra com 18 metros de altura, pendurais em aço, carlingas de madeira e um tabuleiro também construído em madeira. Esta ponte tinha um vão livre de 150 metros e um tabuleiro com 6 metros de largura, sendo 4 metros para a faixa de rodagem e 1 metro para cada um dos passeios. Do lado da cidade do Porto os obeliscos de pedra do século XIX permanecem praticamente intactos, encontrando-se classificados pelo IPPAR como "Imóvel de Interesse Público" [2]. Segundo relatos da época, a Ponte Pênsil "abanava como varas verdes", facto que causava uma grande sensação de insegurança aos utentes [1]. Após algumas décadas de utilização começaram a surgir problemas de corrosão dos cabos, dificuldades em inspeccionar as zonas das ancoragens e um grande receio de um colapso repentino. A ocorrência de dois acidentes em França, com pontes do mesmo tipo, foi um factor que contribuiu para a decisão da sua demolição, logo que a Ponte Luiz I passou a poder ser utilizada à cota baixa [1].

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA NOVA SOLUÇÃO

Tendo em vista a construção de uma nova travessia pedonal sobre o rio Douro entre as cidades do Porto e Gaia têm sido divulgadas diversas alternativas que são em seguida enumeradas.

→ 1993

Ponte pedonal proposta pelo arquitecto Duarte Castel-Branco e incluída no Plano Director Municipal de 1993. Esta nova ponte nasceria em frente à igreja de S. Francisco e teria um comprimento total sobre o rio Douro de cerca de 290 metros [3].

→ 2000

Ponte constituída por um arco tubular construído em aço inoxidável e por um tabuleiro revestido a madeira sobre ele apoiado. Esta ponte foi proposta pelo engenheiro Adão da Fonseca e a sua localização coincidiria com a da antiga Ponte Pênsil [4].

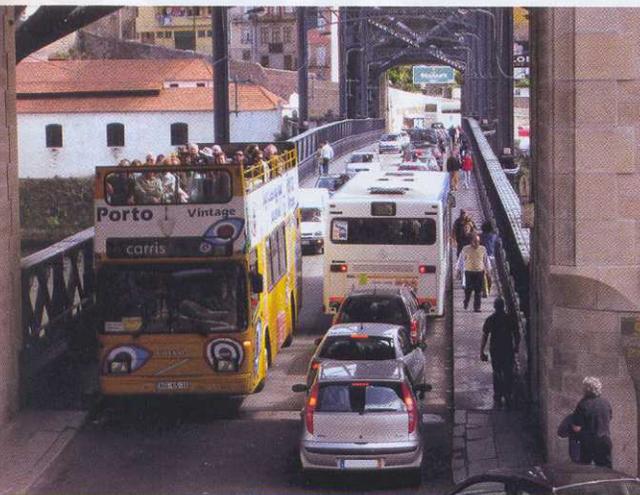
→ 2006

Ponte suspensa de um único pilar com 60 metros de altura localizado do lado da cidade de Gaia. Esta proposta do engenheiro Adão da Fonseca ligaria a zona do Cais de Gaia a um local situado a jusante da Praça da Ribeira, tendo o rio Douro neste local uma largura de cerca de 250 metros [3].

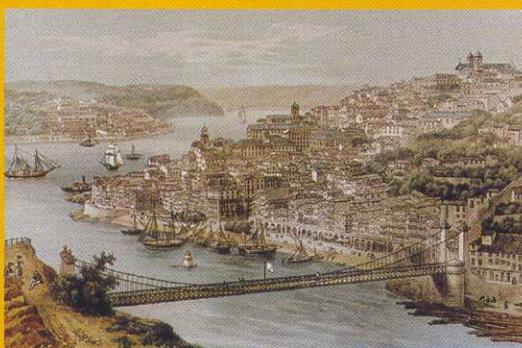
A solução proposta em 2006 pelos autores destas linhas (figura 4) apresenta uma localização coincidente com a da antiga Ponte Pênsil, podendo ser encarada como a sua "reconstrução", uma vez que se pretende reutilizar os obeliscos existentes (figura 5). Para evitar críticas semelhantes às que surgiram em 2000/2001 [5], que se centravam na descaracterização da Ponte Luiz I devida à proximidade da nova ponte, é proposta uma solução transparente e que se supõe quase imperceptível quando observada de longe (figura 6). Deste modo a grandiosidade da Ponte Luiz I e de todo o local em que se insere seria preservada, sendo até reposta a situação que existiu durante uns breves meses de 1887 (figura 3). A referida transparência seria conseguida devido ao paralelismo e coincidência de cotas entre o novo tabuleiro e o tabuleiro inferior da Ponte Luiz I, devido à utilização do vidro estrutural no novo tabuleiro e devido à utilização de um material de elevada resistência nos cabos de sustentação, facto que permite uma diminuição da sua secção transversal. Assim se espera que a proposta seja bem aceite e que constitua uma solução de baixo custo, situada no local em que o rio é mais estreito e em que as margens apresentam uma cota adequada à construção de uma ponte que permite o tráfego fluvial em condições semelhantes às actuais. Tal como o tabuleiro inferior da Ponte Luiz I, a nova ponte situa-se acima da cota máxima de cheia e passa a constituir uma plataforma privilegiada de observação da paisagem urbana das cidades do Porto e Gaia, sem a interferência do rendilhado de barras entrecruzadas que presentemente obstruem o campo de visão de quem faz a travessia (figura 1).

MATERIAIS A UTILIZAR

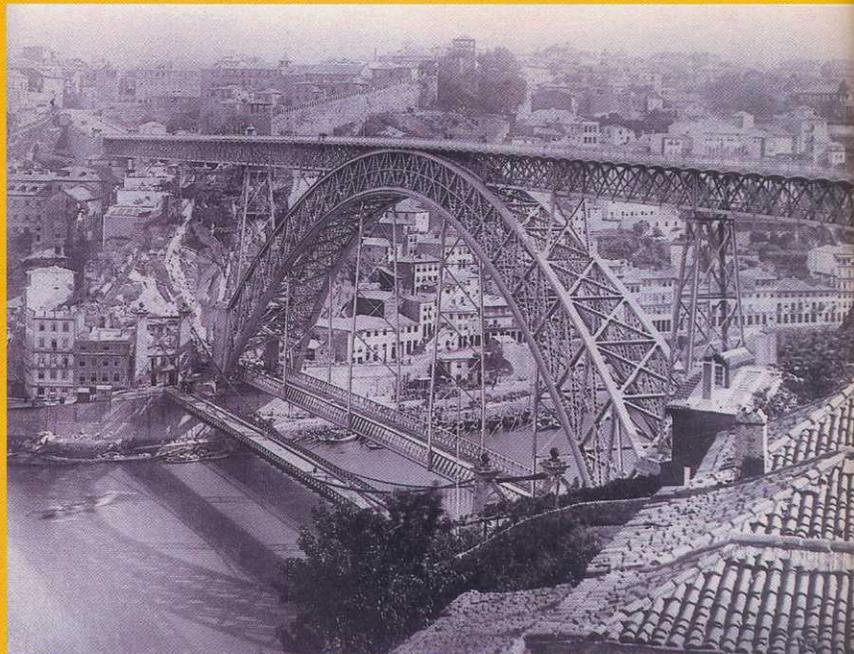
Tal como foi atrás referido, é adoptado para todo o sistema de cabos um material de elevada resistência e leveza, tendo a escolha recaído num compósito constituído por fibras de carbono unidireccionais do tipo P-75 e por uma matriz polimérica Epoxy-934 [6]. O material compósito que resulta desta combinação apresenta, na direcção longitudinal, uma elevada resistência à tracção (tensão de rotura de 999 MPa), um elevado módulo de elasticidade (310 GPa), uma extensão última à tracção de 0.31 %, um baixo peso volúmico (14 kN/m³), um baixo coeficiente de dilatação térmica (-1.17x10⁻⁶ / °C), uma elevada resistência à fluência e à fadiga, uma grande estabilidade química, um baixo coeficiente de atrito e uma elevada resistência à degradação com o tempo. Os únicos inconvenientes deste material consistem na sua anisotropia e na menor resistência à compressão do que à tracção. Nenhum destes



1. Intensidade do tráfego pedonal e rodoviário no tabuleiro inferior da Ponte Luís I



2. Desenho da Ponte Pênsil que foi construída e demolida no século XIX



3. Ponte Pênsil e Ponte Luís I, lado a lado, no final do ano de 1887
Gentilmente cedida por Daniel Gonçalves do seu arquivo pessoal

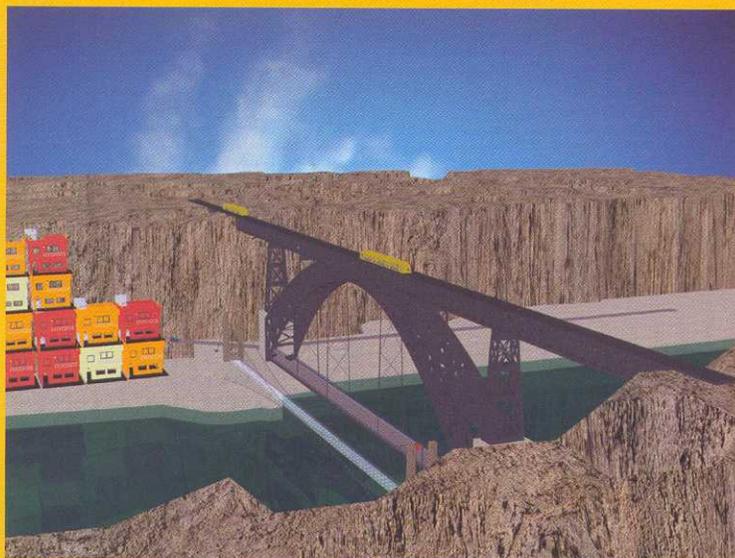
inconvenientes é susceptível de prejudicar a sua utilização num cabo de sustentação de uma ponte. O recurso mais generalizado a materiais compósitos baseados em fibras de carbono tem sido limitado devido ao seu elevado custo. No caso da reconstrução da Ponte Pênsil, proposta neste trabalho, justifica-se este custo adicional devido ao objectivo de se conseguir que os cabos apresentem um diâmetro inferior ao das soluções convencionais, diminuindo-se assim o impacto visual sobre a Ponte Luís I. O material seleccionado para o tabuleiro da nova Ponte Pênsil é o vidro temperado. Este material apresenta uma grande transparência, sendo os seus inconvenientes ultrapassados com o recurso a materiais modernos e bem estudados. O problema da resistência estrutural de grandes painéis destinados à circulação de pessoas pode ser ultrapassado com recurso à justaposição de camadas de vidro temperado e de PVB, sendo assim eliminado o risco de rotura frágil [7]. O excesso de deformação e a associada sensação de insegurança são obviados pela adopção de uma espessura considerável e devidamente dimensionada. Na superfície superior é possível a existência de uma camada de desgaste e de elementos anti-derrapantes [7]. Uma solução semelhante à aqui proposta foi adoptada no Grand Canyon Skywalk (EUA) [8].

DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO PARA A NOVA PONTE PÊNSIL

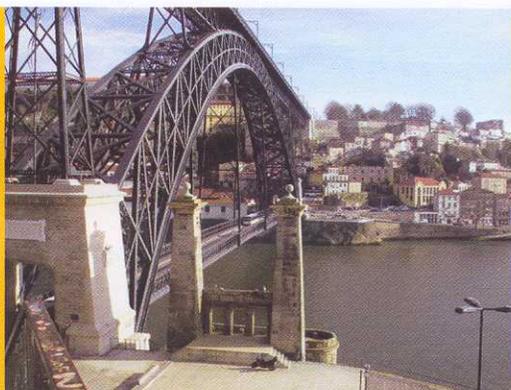
São em seguida apresentadas as principais características do projecto de reconstrução da Ponte Pênsil, recorrendo aos materiais descritos na secção anterior.

Os obeliscos de granito com 18 metros de altura, existentes do lado do Porto, são mantidos, sendo necessário construir obeliscos idênticos do lado de Gaia. Estes últimos são constituídos por um núcleo de betão armado revestido a granito de modo a reproduzirem fielmente os que existem do lado do Porto. Pretende-se ainda recolocar a travessa metálica que originalmente unia em cada uma das margens os topos dos obeliscos. Os cabos parabólicos superiores e inferiores, os pendurais verticais e as diagonais (figura 7) são construídos com fibras de carbono unidireccionais do tipo P-75 e por uma matriz polimérica Epoxy-934, tendo todos uma secção transversal circular. Os cabos parabólicos superiores têm um diâmetro de 15 cm, bem como os inferiores. Os pendurais verticais e as diagonais apresentam uma secção transversal com um diâmetro de 3 cm. Para se efectuar as ligações nos nós estão previstas abraçadeiras sobre os cabos parabólicos às quais se fixam os pendurais e as diagonais. Estes são ligados ao tabuleiro por intermédio de dispositivos que permitem em qualquer fase da vida da estrutura uma afinação do esforço instalado em cada cabo.

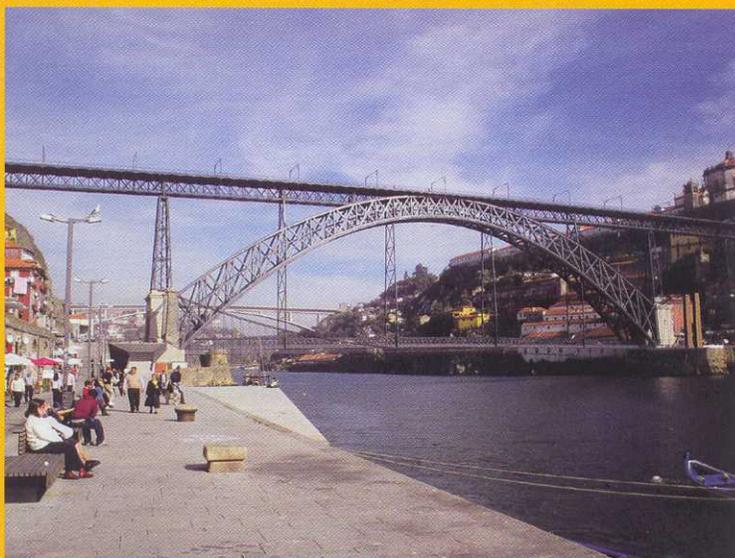
O tabuleiro é constituído por uma grelha de cantoneiras 100x100x12 (mm), sendo estas dimensões condicionadas pela espessura dos painéis de vidro e pelas suas ligações elásticas. As cantoneiras são soldadas entre si, constituindo assim uma grelha com cerca de 170 metros de comprimento total (figura. 8). Nas extremidades são colocados dispositivos que permitem movimentos lentos (e.g., dilatação térmica), mas que impedem deslocamentos longitudinais bruscos, tais como os



4. Reconstrução da Ponte Pênsil: solução proposta em 2006

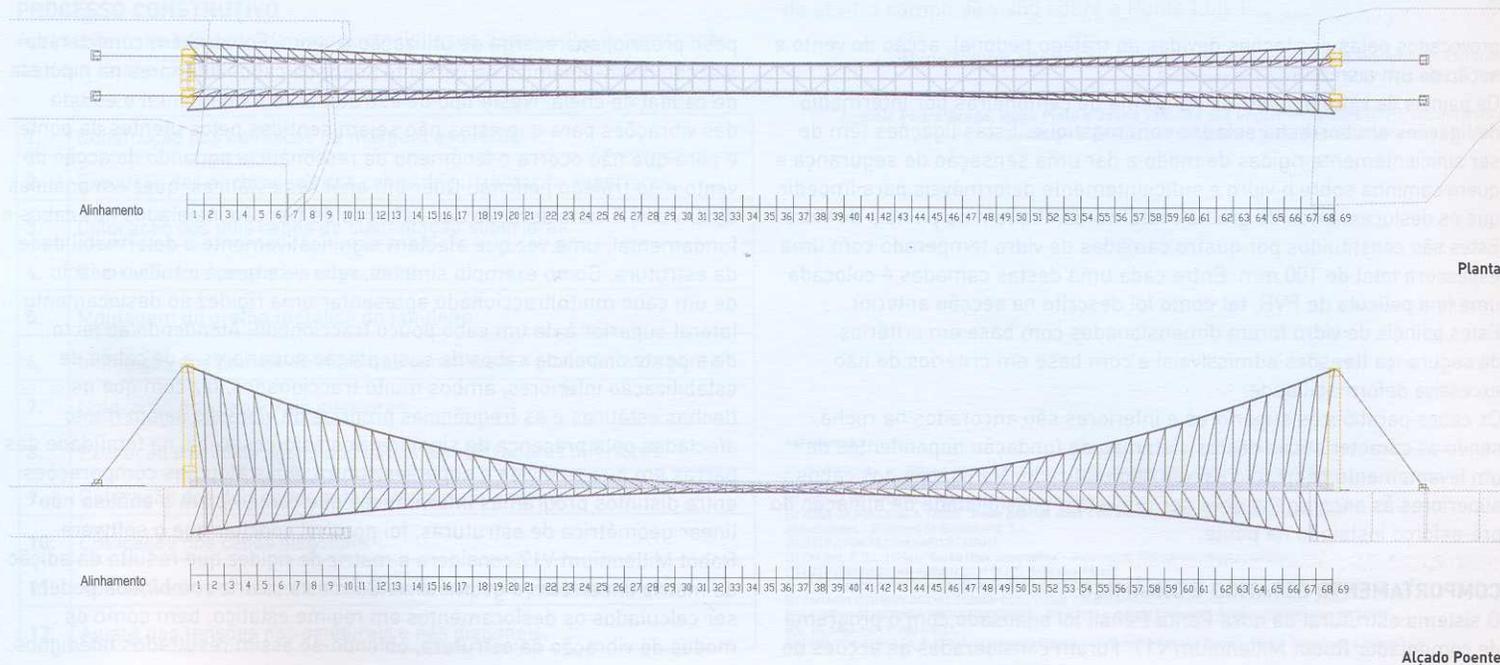


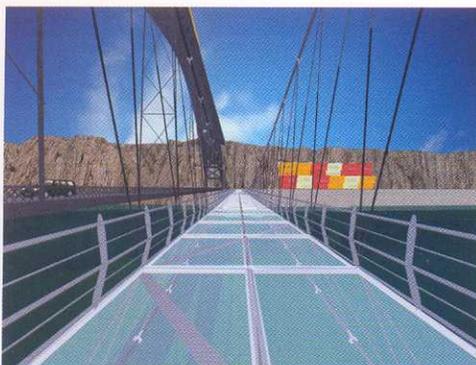
5. Obeliscos originais que foram preservados apenas do lado do Porto



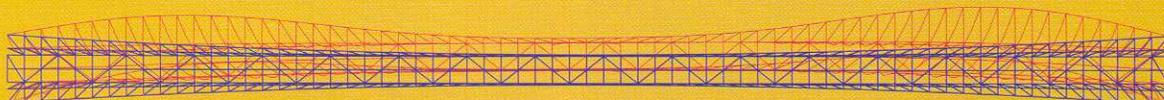
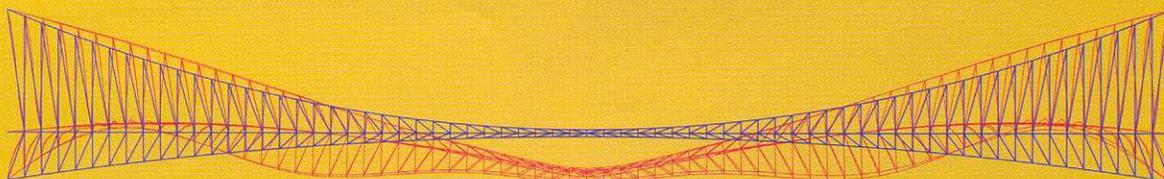
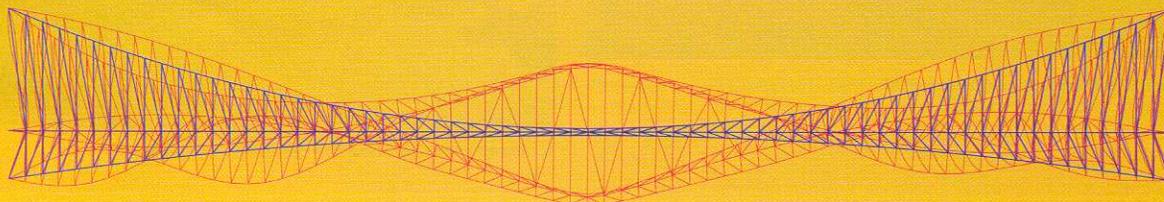
6. Impacto visual da nova Ponte Pênsil sobre a Ponte Luiz I

7. Planta e alçado da nova Ponte Pênsil





7. Tabuleiro de vidro transparente

9. Primeiro modo de vibração horizontal ($f = 1.6 \text{ Hz}$)10. Primeiro modo de vibração vertical ($f = 3.2 \text{ Hz}$)11. Primeiro modo de vibração torcional ($f = 3.3 \text{ Hz}$)

provocados pelas oscilações devidas ao tráfego pedonal, acção do vento e acção de um sismo.

Os painéis de vidro apoiam-se na grelha de cantoneiras por intermédio de ligações em borracha seladas com mastique. Estas ligações têm de ser suficientemente rígidas de modo a dar uma sensação de segurança a quem caminha sobre o vidro e suficientemente deformáveis para impedir que os deslocamentos da grelha metálica danifiquem os painéis de vidro. Estes são constituídos por quatro camadas de vidro temperado com uma espessura total de 100 mm. Entre cada uma destas camadas é colocada uma fina película de PVB, tal como foi descrito na secção anterior. Estes painéis de vidro foram dimensionados com base em critérios de segurança (tensões admissíveis) e com base em critérios de não excessiva deformabilidade.

Os cabos parabólicos superiores e inferiores são ancorados na rocha, sendo as características destes sistemas de fundação dependentes de um levantamento geotécnico ainda não realizado. Na ligação dos cabos superiores às ancoragens deve ser prevista a possibilidade de afinção do pré-esforço instalado na ponte.

COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO

O sistema estrutural da nova Ponte Pênsil foi analisado com o programa de computador Robot Millennium V17. Foram consideradas as acções do

peso próprio, sobrecarga de utilização e vento. Foi também considerada a acção hidro-dinâmica da corrente sobre os cabos inferiores na hipótese de caudal de cheia. Neste tipo de estruturas, é fundamental o estudo das vibrações para que estas não sejam sentidas pelos utentes da ponte e para que não ocorra o fenómeno da ressonância aquando da acção do vento e do tráfego pedonal. Quer em análises estáticas, quer em análises dinâmicas, a consideração dos esforços de tracção instalados nos cabos é fundamental, uma vez que afectam significativamente a deformabilidade da estrutura. Como exemplo simples, refere-se que é intuitivo o facto de um cabo muito traccionado apresentar uma rigidez ao deslocamento lateral superior à de um cabo pouco traccionado. Atendendo ao facto de a ponte dispor de cabos de sustentação superiores e de cabos de estabilização inferiores, ambos muito traccionados, faz com que as flechas estáticas e as frequências próprias de vibração sejam muito afectadas pela presença de significativos esforços axiais na totalidade das barras em que se divide a super-estrutura. Após algumas comparações entre distintos programas informáticos que contemplam a análise não linear geométrica de estruturas, foi possível concluir que o software Robot Millennium V17 considera a matriz de rigidez que resulta da adição da matriz linear com a geométrica. Com esta matriz combinada podem ser calculados os deslocamentos em regime estático, bem como os modos de vibração da estrutura, obtendo-se assim resultados fidedignos.

Na Tabela 1 encontram-se as frequências correspondentes aos primeiros modos de vibração da ponte. São omitidos os modos correspondentes à vibração isolada de cabos.

TABELA 1 – FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DA NOVA PONTE PÊNSIL

Modo	Frequência (Hz)	Tipo
1	1.6	Horizontal
5	1.9	Horizontal
6	2.4	Horizontal
9	2.7	Horizontal
10	3.1	Horizontal
11	3.2	Vertical
12	3.3	Torcional
13	3.4	Vertical
14	3.4	Vertical
15	3.6	Torcional

Nas figuras 9, 10 e 11 encontram-se representadas as deformadas correspondentes aos principais modos de vibração da ponte. Considera-se que ao caminhar sobre uma ponte, um peão lhe aplica uma frequência de excitação de 1 Hz na direcção horizontal e de 2 Hz na direcção vertical. Atendendo às frequências próprias indicadas na Tabela 1, verifica-se que estas são consideravelmente maiores do que as correspondentes frequências de excitação. Foi também efectuado um estudo, de acordo com os regulamentos canadiano [9] e britânico [10], envolvendo acelerações máximas e a sua comparação com os valores admissíveis. Foi também possível concluir que ambos os regulamentos são respeitados, sendo de prever um elevado grau de conforto e sensação de segurança para os peões que atravessam a ponte.

PROCESSO CONSTRUTIVO

Apresentam-se em seguida as principais fases associadas à construção da nova Ponte Pênsil.

1.	Construção dos obeliscos da margem esquerda.
2.	Execução das ancoragens dos cabos de sustentação superiores.
3.	Colocação dos dois cabos de sustentação superiores.
4.	Colocação dos pendurais superiores.
5.	Montagem da grelha metálica do tabuleiro.
6.	Instalação dos painéis de vidro que constituem o pavimento da ponte.
7.	Colocação dos pendurais inferiores.
8.	Execução das ancoragens dos cabos estabilizadores inferiores.
9.	Colocação dos dois cabos estabilizadores inferiores.
10.	Colocação dos cabos diagonais.
11.	Aplicação do pré-esforço nos cabos de sustentação superiores.
12.	Ajuste das tensões nos pendurais e nas diagonais.

Uma vez que a generalidade das componentes da ponte podem ser pré-fabricadas, prevê-se um prazo de construção muito curto.

ESTIMATIVA DE CUSTOS

A principal componente do custo da nova Ponte Pênsil está associada ao sistema de cabos em material compósito de fibra de carbono. Apesar do seu preço elevado, o orçamento total relativo à construção da ponte que é aqui proposta não excederia 3 milhões de Euros. Como comparação, refere-se que o custo da ponte em arco de aço inox prevista no ano 2000 para o mesmo local seria de 7 milhões de Euros [4] e que a ponte suspensa de um único pilar proposta em 2006 teria um orçamento superior a 10 milhões de Euros [11].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal vantagem da solução aqui proposta consiste na resolução do problema do tráfego de peões e de bicicletas entre as duas margens, por intermédio da construção de uma nova ponte que repõe uma situação que já existiu em finais do século XIX. Esta nova ponte fica localizada no troço em que o rio é mais estreito, não coloca qualquer entrave ao tráfego fluvial, respeita a cota máxima de cheia e fica localizada numa zona convidativa em termos de atracção do tráfego pedonal. A nova Ponte Pênsil apresenta-se como uma solução que respeita a estética do local, não constituindo uma obstrução visual significativa relativamente à Ponte Luiz I. Por ser uma ponte de vidro, de grande transparência, tornar-se-á certamente um importante pólo de atracção turística, à semelhança do que ocorreu com o Grand Canyon Skywalk. A zona central da nova ponte constituirá uma plataforma de observação privilegiada das cidades do Porto e Gaia, pelo facto de, ao contrário do que ocorre presentemente, permitir um campo de visão completamente desobstruído. Relativamente à obstrução visual sobre a Ponte Luiz I, que a reconstrução da Ponte Pênsil constituiria, convém relembrar que a solução em arco de aço inox que esteve prevista para o mesmo local chegou a receber um parecer positivo do IPPAR em 13 de Março de 2001 [5]. Também se afigura como óbvio que, caso a Ponte Pênsil do século XIX não tivesse sido destruída, hoje ninguém exigiria a sua demolição com o objectivo de abrir o campo de visão sobre a Ponte Luiz I.

Álvaro Azevedo é Engenheiro Civil (U.P.) e Professor de Análise Avançada de Estruturas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

António Pedro Braga, Hugo Pinto e Joana Teixeira são Engenheiros Cívicos (U.P.), encontrando-se a realizar o estágio profissional em gabinetes de projectos de estruturas.

REFERÊNCIAS

- [1] TAVARES DIAS, M.; MORAIS MARQUES, M. (2002). "Porto Desaparecido". Quimera Editores, Lisboa.
- [2] HTTP://WWW.IPPAR.PT (2007). Instituto Português do Património Arquitectónico.
- [3] JORNAL DE NOTÍCIAS, Edição de 25 de Março de 2006.
- [4] ADÃO DA FONSECA, A. (2002). "Ponte pedonal sobre o rio Douro – concepção e processo construtivo". AFAssociados – Projectos de Engenharia, S.A.
- [5] HTTP://PONTE.COM.SAPO.PT (2001).
- [6] CHUNG, D.D.L. (1994). "Carbo fiber composites". Butterworth-Heinemann, Massachusetts.
- [7] HTTP://WWW.SAINT-GOBAIN.COM (2007) "SGG Lite-Floor".
- [8] HTTP://WWW.GRANDCANYONSKYWALK.COM (2007).
- [9] ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE (1983), Ontario Ministry of Transportation, Toronto, Canada.
- [10] BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1978). "Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads", BS: BS 5400, Part 2, Appendix C.
- [11] ADÃO DA FONSECA, A. (2006). "A ponte da Ribeira – caminhando sobre o Douro". Revista Engenharia e Vida (n.º 23).