

# Sbo

**Sebentas d'Obra** Ciclo de construção, do projecto à obra

#06, julho 2016

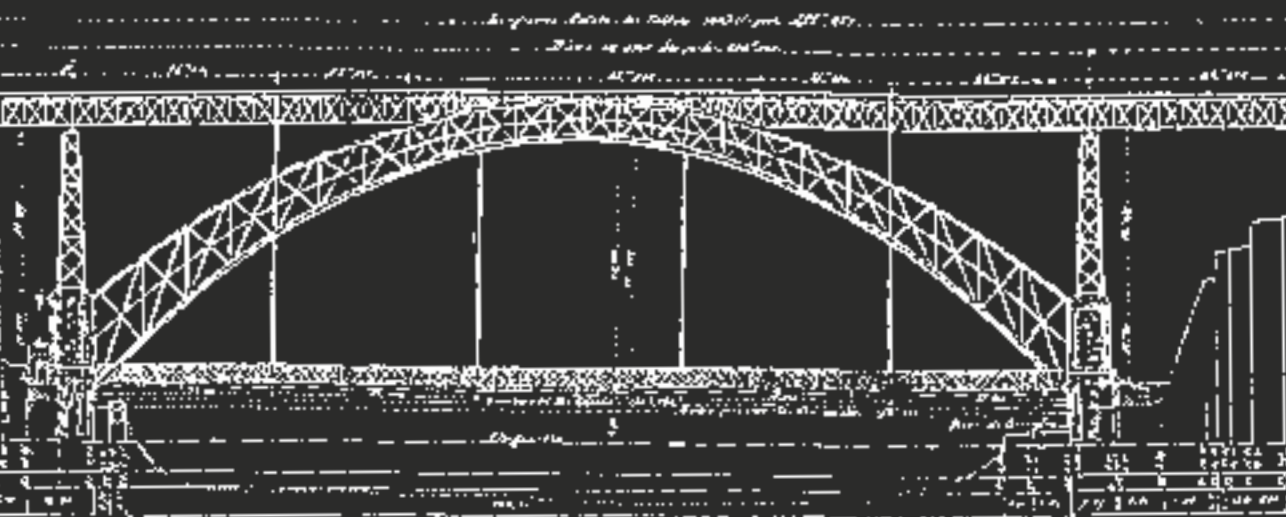
**Recuperação do tabuleiro superior  
da Ponte Luiz I**

Porto

Aníbal Costa

ENSEMBLE

Ensemble de 4° et 5°



**Editor**

Cadernos d'Obra

**Diretor**

Vitor Abrantes

**Coordenação Editorial**

Bárbara Rangel

**Comissão Editorial**

Abel Henriques

Ana Sofia Guimarães

António Silva Cardoso

Joaquim Poças Martins (presidente da OERN)

Paulo Conceição

Rui Faria

**Conceção Gráfica**

Incomun

**Textos**

Textos editados pelo autor retirados do Relatório

"Ponte Luiz I – Viabilidade de Utilização pelo

Metro Ligeiro do Porto" para a empresa Metro da

Área Metropolitana do Porto, S. A. coordenado

por Manuel Azeredo e Aníbal Costa, Instituto da

Construção, FEUP Março de 1996.

**Créditos Fotográficos**

Francisco Piqueiro: páginas 2, 3, 4, 8, 9, 17, 18 em baixo, 19, 20.

Infraestruturas de Portugal e Pencil Engenharia: páginas 13 e 15.

Metro do Porto, SA: página 18 em cima

Restantes imagens, propriedade dos autores.

**Impressão**

Rainho e Neves

2.ª edição, setembro 2019

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 500 exemplares

**Preço por número**

4,50 euros

**Publicação periódica**

n.º 6. Ano II, julho 2016

**Propriedade**

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

A iniciativa "Fora de Portas engenharia civil à mostra", resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

**Iniciativa e produção**

Departamento de Engenharia Civil da FEUP

**Com o apoio de**

Universidade do Porto

Câmara Municipal do Porto

Ordem dos Engenheiros Região Norte

**Editorial.** A reabilitação do património não passa apenas pela recuperação de edifícios. A adaptação das infraestruturas aos novos requisitos da vida contemporânea é e será o desafio que os engenheiros civis terão em mãos nos próximos tempos. Dessas inúmeras infraestruturas a necessitar de cuidado constante fazem parte as “obras de arte” da Engenharia Civil, as pontes, as obras em que a engenharia civil interfere com maior visibilidade. O responsável pela sua conceção tem a oportunidade de mostrar o seu virtuosismo equilibrando ciência e estética numa intervenção que é sempre um marco na paisagem. Tal como um pianista, o engenheiro civil que concebe uma ponte deve conseguir o perfeito domínio da técnica para que a sensibilidade da execução e conceção da ponte possam ser do maior cuidado e delicadeza na forma como interfere com a paisagem. Quando a tarefa é intervir numa ponte já construída, a responsabilidade é ainda maior. Além de garantir esse equilíbrio entre estética e ciência, deve ter-se a capacidade de interpretar a obra, tal como o seu autor a concebeu. Entendendo os legados que o autor aí pretendeu deixar, os responsáveis pela intervenção deverão conseguir numa forma eficaz dar respostas aos novos requisitos garantindo a integridade da obra original, tal como de uma reinterpretação da mesma partitura se tratasse.

O estudo que serviu de base para a intervenção que a Ponte Luiz I sofreu para que se tornasse possível a passagem do Metro é, nesta edição número 6 da **Sebenta d’Obra** resumido por um dos seus autores, o Prof. Aníbal Costa. Reescrever essa nova partitura foi o pedido pelo Metro do Porto a um grupo de investigadores do Departamento de Engenharia Civil. Nesse trabalho, para além de entender o projeto original, formas de cálculo, estratégias urbanas e mesmo formais, procurou-se entender as intervenções que a Ponte Luiz I tinha vindo (ou não) a ser sujeita desde a sua construção, desde as obras correntes de manutenção à delicada intervenção cirúrgica do Prof. Edgar Cardoso. Deste estudo conseguiu-se “desenhar” uma estratégia de intervenção que teve como base potenciar o comportamento de cada componente desta grande máquina, das vigas, às longarinas, aos rebites. Reforçando a função de cada uma delas na estrutura geral, foi possível tornar a ponte mais robusta, sem ferir a sua forma e leitura original. Este trabalho é, não só uma lição de Engenharia Civil de Estruturas, mas uma lição de intervenção no património das pontes. Lição essa que deverá ser profundamente estudada pelos próximos “cirurgiões” que irão intervir nesta e noutras pontes, de forma a que as necessidades contemporâneas não se sobreponha à magnitude da Obra de Arte original.

Depois da conferência proferida pelo Prof. Aníbal Costa, onde nos explicará este estudo e desvendará a já longa história desta ponte, iremos visitar o passadiço técnico do Ponte Luiz I. Será possível entender de perto a importância de cada parafuso e deixar-se encantar pelo mistério de vencer a distância entre as duas margens com um conjunto articulado de componentes unidos para suportar apenas uma reta entre dois pontos, a Obra de Arte!

Bárbara Rangel  
21 de julho 2016

# Reabilitação do tabuleiro superior da Ponte Luiz I





Este artigo resulta da extração de uma pequena parte do trabalho que foi terminado em Março de 1996 pelo Instituto da Construção da FEUP, para a empresa Metro da Área Metropolitana do Porto, S. A., coordenado pelos professores Manuel Azeredo e Aníbal Costa, denominado “Ponte Luiz I – Viabilidade de Utilização pelo Metro Ligeiro do Porto”. Este trabalho era composto por um Relatório Final, da autoria dos Professores Aristides Guedes Coelho, José António Mota Freitas, Manuel de Azeredo, Aníbal Guimarães da Costa e dos engenheiros, Nuno Eduardo dos Santos, José Sena Cruz e Duarte Barroso Lopes.

Desse trabalho apresenta-se essencialmente um resumo histórico da construção da Ponte e algumas partes da modelação usada e da análise dos resultados. Deve-se realçar a ajuda preciosa do ex-funcionário da Junta Autónoma das Estradas (JAE), Sr. Antero Pinto, que sempre se disponibilizou a acompanhar-nos nas visitas e nos proporcionou o relato de alguns episódios relacionados com a sua experiência e vivência na Ponte Luiz I. Deve-se referir que na altura era dos poucos funcionários da JAE que ainda fazia inspeções regulares às pontes do Douro e que durante muitos anos foi o responsável pela manutenção das mesmas chegando a chefiar uma equipa com mais de 20 homens.



# 1. Resumo histórico da construção da Ponte Luiz I

A Ponte Pênsil garantiu a ligação entre as duas margens do rio Douro, a partir de 18 de Fevereiro de 1843, em substituição da Ponte das Barcas, cuja utilização era já muito precária.

Decorridos 33 anos, em 17 de Fevereiro de 1876, a Câmara do Porto pede ao Governo a substituição da Ponte Pênsil, porquanto era previsível a sua falta de segurança, dada a dificuldade em evitar a corrosão dos dispositivos de amarração dos cabos e havendo o conhecimento de roturas em obras análogas, noutros países, em pontes com menos de 20 anos de serviço. Na sequência daquele pedido, por portaria de 22 de Abril de 1876, o Engenheiro Bento Coutinho d'Almeida d'Eça é encarregado de elaborar um anteprojecto da ponte, entre o Cais de Gaia e a Praça da Ribeira. Aliás, já por altura da inauguração da Ponte Maria Pia em 11 de Novembro de 1876, Gustave Eiffel apresentava a D. Luiz I um estudo em que considera a possibilidade da construção de nova ponte nas imediações da Ponte Pênsil.

Em Dezembro de 1877 é concluído o anteprojecto da ponte pelo Engenheiro Bento Fortunato. No entanto esse

estudo não teve continuidade e assim, durante o ano de 1879, por Portaria do Ministério do Reino, é nomeada uma comissão para dar parecer sobre o local mais conveniente para a construção da ponte. Verificou-se então que o local mais votado é o da Ponte Pênsil, ou nas suas proximidades. Em 1879 a firma Gustave Eiffel et C<sup>ie</sup>. apresenta um projecto apenas com um tabuleiro ao nível da Ribeira e com um sector levadiço na zona central, que daria passagem a embarcações até 35 m de altura de mastreação. Este projecto não é, no entanto, aceite por já se pretender a existência de 2 tabuleiros sobrepostos.

Em 11 de Agosto de 1880 abre-se finalmente um concurso para a nova ponte. Aparecem então diversos concorrentes: SOCIÉTÉ DE BRAINE LECONTE, SOCIÉTÉ DES BATIGNOLLES (com 2 soluções), GUSTAVE EIFFEL ET CIE, AUGUSTE LECOQ, ANDREW HANDYSIDE, SOCIÉTÉ WILLEBROECK (com 2 soluções) e JOHN WIXON. A adjudicação da obra foi efetuada em 27 de Maio de 1881 à SOCIÉTÉ ANONYME DE CONSTRUCTIONS ET DES ATELIERS DE WILLEBROECK pela quantia de 389.000\$00. Em Abril desse ano, o Engenheiro chefe



A Ponte das Barcas



A Ponte Pênsil

da casa Eiffel contesta a escolha do projeto. A contestação não é atendida e em 28 de Novembro de 1881, celebra-se o contrato com a SOCIÉTÉ WILLEBROECK, que apresenta um projeto da autoria de **Teophile Seyrig**, engenheiro belga, discípulo de Gustave Eiffel e seu sócio na construção da Ponte Maria Pia.

As características fundamentais da Ponte são as seguintes: arco com 172 m de corda e 45,1 m de flecha; tabuleiro superior com uma extensão de 391,25 m e inferior com 174 m, valores com ligeiras diferenças relativamente ao projeto original. A secção transversal do tabuleiro inferior apresenta uma largura total de 8 m, sendo 5,5 m destinados à faixa de rodagem e os restantes 2,5 m a passeios laterais, de 1,25 m cada. O tabuleiro superior apresentava inicialmente 6 m de largura, 4 m para a faixa de rodagem e os restantes 2 m para passeios laterais.

Em 1 de Dezembro de 1881 iniciam-se os trabalhos de construção da ponte, solenemente comemorados com a presença do Rei, da Rainha, dos Príncipes, Cardeal D. Américo, altos dignatários, autoridades, engenheiros e muito povo. O Rei D. Luiz I, depois de receber as saudações devidas dirigiu-se ao jardim da “Esplanada da Fortaleza da Serra do Pilar” onde acionou “uma machina electro-magnética que por meio de dous fios condutores... ligada a uma mina da encosta da Serra onde terá de fundar-se o encontro esquerdo da mencionada Ponte”,



Fase construtiva da Ponte Luiz I, impondo-se à Ponte Pênsil

segundo o auto então elaborado e assinado.

Cedo se verificou, no entanto, que esta largura do tabuleiro superior era insuficiente, pois punha-se a hipótese da colocação de uma linha de “tramways”. Assim, pouco antes da conclusão da ponte, a sociedade adjudicatária fornece um estudo que prevê o aumento da largura do tabuleiro de 6 para 8 m, datado de 16 de Dezembro de 1882. Esta alteração é aprovada em 25 de Setembro de 1883, vindo a custar 20.476\$680.

Apesar deste aumento da largura do tabuleiro superior, não ocorreram grandes alterações estruturais para a ponte, tal como Seyrig apresenta na sua memória: “... o afastamento das vigas fica o mesmo, as peças sob a calçada, longarinas, carlingas e chapas embutidas ficam igualmente as mesmas. As partes que sofrem uma modificação são pois as consolas dos passeios, as longarinas bordando estas e os contraventamentos verticais em cruz de Santo André. As vigas principais sofrem uma modificação pela adição de banzos suplementares cuja disposição feliz permite economizar tabuleiro, e uma outra modificação relativa ao reforço da rótula (treillis). Estas duas mudanças são pois devidas ao aumento natural do peso do conjunto do tabuleiro.” Seyrig demonstrou ainda que apesar deste aumento de peso do tabuleiro, (mais 43%), o arco em si apenas passa a suportar mais 16% da carga permanente, o que se compreende pelas cargas que se encaminham diretamente para os apoios exteriores ao mesmo.

Em Maio de 1886 são mandadas efetuar as primeiras provas de carga, e no dia 31 de Outubro do mesmo ano, dia do aniversário do Rei D. Luiz I, a Ponte é inaugurada pelo Rei e benzida pelo Cardeal D. Américo. No dia da inauguração não se pagou qualquer portagem, mas a partir do dia seguinte, os peões pagavam cinco reis para atravessar a Ponte. A partir de 1 de Julho de 1913 os peões deixaram de pagar portagem, continuando os veículos e animais a pagar, situação que se manteve até 1 de Janeiro de 1944, data em que o pagamento de portagem foi completamente abolido.

Segundo uma publicação de “O Comércio de Gaia” de 18/10/1954, o primeiro carro elétrico terá atravessado a Ponte no dia 28 de Outubro de 1905. Não se encontram no entanto outros documentos que confirmem esta data ou que indiquem o início dos trabalhos de colocação dos carris. O que se sabe é que inicialmente apenas

foi colocada uma via, ocorrendo o assentamento da 2.<sup>a</sup> via entre 1931 e 1932. Existe uma memória descritiva referente ao assentamento da 2.<sup>a</sup> via para carros elétricos, que coincidiu com a alteração do pavimento. Esta memória apresenta uma sumária descrição da verificação de estabilidade, onde se conclui pela necessidade de reforçar as carlingas com chapas de banzo de modo a que aquelas não trabalhassem acima dos limites de resistência. Por razões desconhecidas, essas carlingas não chegaram a ser reforçadas. A opção da colocação da 2.<sup>a</sup> via é tomada após o relatório de 28 de Maio de 1931, elaborado pela então Comissão de Pontes, que já em 20 de Dezembro de 1930 efetuava provas de resistência das carlingas do tabuleiro superior e ensaios dinâmicos para detetar o perigo de eventual rotura. No relatório de 1931 descrevem-se também ensaios estáticos e dinâmicos que conduziram à seguinte conclusão: “... não há inconveniente nos cruzamentos de zorras e de carros elétricos, de qualquer destes veículos com camiões e camionetas ou ainda destes veículos entre si desde que todos eles sejam do tipo dos que atualmente circulam na região.”

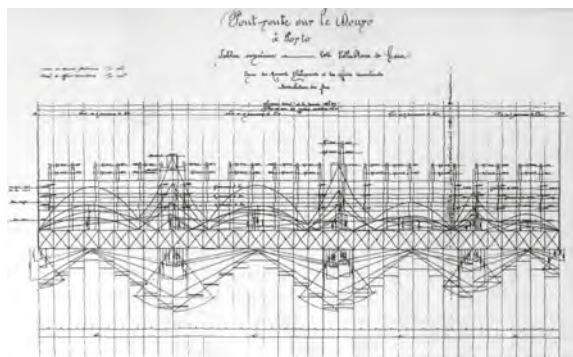
Por aquela altura já a Ponte tinha sofrido uma grande reparação quer ao nível da substituição de algumas peças metálicas quer na alteração dos pavimentos, tendo ainda sido completamente pintada. Não se sabe exatamente quando foi efetuada esta reparação, parece no entanto ter tido lugar posteriormente a 1908, ano em que, a 7 de Agosto, a Comissão de Verificação da Resistência das Pontes e Construções Metálicas elabora um relatório referente ao estado da Ponte. Descrevem-se nesse documento as boas condições em que o arco se encontra, à exceção das carlingas do extradorso que suportam a parte central do tabuleiro superior.

Existe ainda um “Serviço da República” de 31 de Dezembro de 1926, onde, mais uma vez, se evidencia o mau estado de ambos os tabuleiros e se apela para a sua urgente reparação. Este apelo já teria sido efetuado num outro relatório de 1 de Maio de 1920, onde todos os problemas da Ponte teriam sido apresentados. Neste “Serviço”, aconselha-se ainda o respeito pela velocidade máxima indicada para a Ponte, ao que parece nem sempre respeitada, o que teria vindo a provocar oscilações prejudiciais para a mesma, oscilações essas agravadas pelo mau estado do pavimento. Cita ainda

esse documento um dado bastante importante e que diz respeito às sobrecargas utilizadas no dimensionamento da ponte. Independentemente da largura da Ponte, foi considerada uma carga de 2000 Kg por metro linear. O veículo-tipo utilizado no cálculo das carlingas e longarinas pesava 3000 Kg por roda com eixos afastados de 3 m pesando um total de 12 000 Kg.

Existe mais uma memória descritiva do estado da ponte, possivelmente do ano de 1927, provavelmente a mais completa até àquela data, onde se relatam situações curiosas: “... muito maior o número de peças cujo estado de conservação é mau do que d’aquelas para as quais esse estado já era conhecido, acrescendo ainda agora as danificadas pelos bombardeamentos ocorridos durante a última revolução (...) Da parte inferior do arco, o segundo montante do lado do Porto tem 32 barras cortadas por metralha (...) Alguns goussets de ligação das barras de contraventamento horizontal dos tubos verticais médios onde se apoiam as escadas de caracol, estão completamente cortados pela ferrugem o que constitui um perigo para a estabilidade dos pilares (...) As guardas dos passeios do tabuleiro superior sofreram bastante com o tiroteio.” Concluindo-se a certa altura “A conservação da ponte tem deixado tanto a desejar que, tendo em 1908 colhido n’ela a Comissão de Pontes uns pedaços de ferrugem de espessura superior a 6 m/m dizia o Director das Obras Públicas do Porto em ofício de 11 de Maio de 1920 terem passado doze anos sobre aquela data sem que outras providências fossem tomadas além das pinturas, feitas com longos intervalos e por empreitada. Pondo os empreiteiros os seus interesses acima das exigências de uma perfeita conservação.” Ainda nesta memória descritiva se aconselha vivamente à substituição dos pavimentos por outros mais leves e de características mecânicas mais adequadas, apresentando-se assim diferentes soluções para ambos os tabuleiros, quer ao nível da faixa de rodagem quer dos passeios.

Não se possui documentos comprovativos de que outras reparações gerais necessárias ao longo do tempo tenham sido levadas a cabo. Ao que parece as reparações foram reiniciadas aos poucos, tendo a última grande reparação tido lugar em 1930. Como se verifica a maioria dos documentos apresentados têm como objetivo o levantamento das anomalias da Ponte, que grosso



Projeto original da Ponte Luiz I, diagrama de momentos fletores e esforços transversos

modo se resumem ao seguinte: a Ponte necessita de ser raspada e pintada, reforçada em alguns pontos, substituídas por completo algumas peças, reforçadas outras, aligeirados os pavimentos e criado um serviço especializado de manutenção com carácter permanente.

Em 1954 a ponte sofreu uma grande alteração, mediante projeto do Engenheiro Edgar Cardoso, que promoveu o aligeiramento dos 2 pavimentos e mudou o esquema estrutural da Ponte de modo que esta pudesse manter a sua estética. Esta obra foi levada a cabo pela quantia de 1.270.500\$00 e permitiu aligeirar os tabuleiros em mais de uma tonelada de carga permanente por metro linear e manter a esbelteza da peça que realiza o primeiro apoio a partir do meio da Ponte.

Nos inícios dos anos 90 do século XX começam a ser efetuados os estudos para avaliar a possibilidade de utilização do tabuleiro superior da Ponte Luiz I pelo Metro Ligeiro do Porto. Esses estudos abrangeram diversas áreas da Engenharia Civil, salientando-se o Relatório Final já referido no início do artigo e 10 Anexos em que colaboraram os engenheiros Fernando Oliveira, João Paulo Colejo, João Paulo Gonçalves, Miguel Figueiredo, Paulo Tavares de Castro e António Augusto Fernandes (Anexo 3); Carlos Sousa Oliveira e Aníbal Guimarães da Costa (Anexo 4); Raimundo Moreno Delgado e Rui Artur Bártoło Calçada (Anexo 5); Raimundo Moreno Delgado e Aires Fernando Camões de Azevedo (Anexos 6 e 7). Atendendo à quantidade de trabalho realizado iremos resumir alguns aspetos particulares nomeadamente com a modelação da estrutura e com a análise dos resultados.





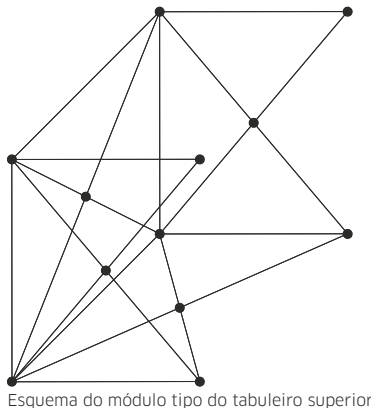
## 2. Modelação da estrutura

Atendendo à elevada dimensão da estrutura, principalmente o elevado número de nós e de barras, esta foi dividida em 4 grandes blocos: o tabuleiro superior, o tabuleiro inferior, o arco e os 3 pilares metálicos. Esta divisão em 4 blocos visava simplificar qualquer alteração que fosse necessário efetuar, permitindo retirar qualquer bloco da estrutura global, proceder a alterações e voltar a juntá-lo à estrutura. No sentido de se avaliar a fiabilidade dos cálculos, foram previamente gerados os 4 primeiros tramos do tabuleiro superior, já que o seu funcionamento como viga contínua permitia verificações relativamente simples. Estes cálculos prévios possibilitaram a resolução de alguns pequenos problemas que foram surgindo e a certeza de que os dados estavam bem introduzidos, para além de permitirem a comparação dos resultados com o modelo da estrutura global da Ponte bem como com o projeto original. Para o estudo global, inicialmente usou-se uma modelação em Trelíça Tridimensional. Esta solução veio a revelar algumas dificuldades resultantes do aparecimento de certas hipostaticidades que exigiriam a introdução de grande número de elementos fictícios no cálculo, e ainda a dificuldade em modelar certas particularidades da estrutura.

Acabou por se optar por uma modelação em Estrutura Reticulada Espacial Contínua. Esta solução se por um lado mais morosa quer ao nível da introdução de dados quer do cálculo, por outro lado permitiu definir alguns pormenores estruturais com mais exatidão, obtendo-se resultados obviamente mais precisos.

### Modelação do tabuleiro superior

O tabuleiro superior apresenta, à exceção da zona de contacto com o arco, uma configuração repetitiva de um módulo do seguinte tipo, representado na figura seguinte.



Esquema do módulo tipo do tabuleiro superior

Os dados relativos ao tabuleiro superior tornaram-se assim facilitados por geração automática através da repetição do módulo ao longo de todo o tabuleiro. Note-se que se respeitaram as medidas em conformidade com cada tramo em estudo, pois nem todos os módulos apresentam as mesmas dimensões. Apresentando para qualquer dos casos uma altura de 5 m e uma largura de 4,7 m os comprimentos é que variavam. Os restantes tramos, na zona de contacto com o arco, tiveram de ser estudados conjuntamente com este de modo a respeitar a respetiva variação parabólica.

### Modelação do tabuleiro inferior e montantes de suspensão

O tabuleiro inferior e os montantes foram modelados conforme o desenho acima, com o objetivo de obter o correto valor das reações no topo dos montantes de suspensão, isto em termos de peso próprio, sobrecargas e ação do vento, para o modelo estático.

## Modelo simplificado do tabuleiro inferior

A geometria dos montantes de suspensão foi assim considerada de acordo com a estrutura real. Já para o tabuleiro considerou-se apenas uma única barra com área, inércia e peso equivalente a todo o tabuleiro inferior.

Relativamente ao estudo dinâmico, a colocação do tabuleiro inferior foi fundamental para a efetuação de uma correta análise do comportamento global da estrutura. Assim para os estudos dinâmicos levados a cabo, colocou-se o tabuleiro inferior da mesma forma simplificada que para o modelo estático, mas de tal modo que traduzisse corretamente o seu comportamento. Esta simplificação foi efetuada visto não estar propriamente em análise a estabilidade estrutural daquele tabuleiro, mas sim a sua influência no resto da estrutura. Assim o importante era que as ações nele aplicadas e o seu peso próprio fossem corretamente transmitidas à estrutura resistente. Não interessando portanto definir ao pormenor a geometria do mesmo, particularmente complicada de definir na zona das vigas principais.

## Modelação do arco

Já se referiu que o arco apresenta um desenvolvimento parabólico, quer em planta quer em alçado. Foram desenvolvidas equações que regiam essas parábolas, articulando-se com os correspondentes desenhos em alçado e em planta.

Os parâmetros que definiam essas equações foram encontrados por medição direta sobre os desenhos do projeto original.

## Modelação dos pilares

Relativamente aos pilares, salienta-se que apenas os pilares metálicos foram modelados, dado que os de alvenaria, por apresentarem elevada rigidez, são para a Ponte considerados como apoios simples.

Dado que os pilares metálicos apresentam dupla simetria, igualmente se tornou simples a sua geração automática, criando-se apenas um lado maior e outro menor e, por simetria os restantes ficam imediatamente definidos.



## Pilar metálico n.º 1 situado em Gaia

Os dois pilares bastante esbeltos entre o arco e o tabuleiro superior foram modelados pela simples adição de barras compreendidas entre os nós daquelas duas sub-estruturas.

### Modelação dos apoios

O tabuleiro superior apoia-se sobre os pilares metálicos através de dispositivos que permitem translação longitudinal em tudo idêntico aos usados em apoios simples, tal como os que existem sobre os pilares de alvenaria, aos quais se referem as imagens seguintes.

Apoio entre o tabuleiro superior e um pilar metálico e um pilar de alvenaria

Por isso, os apoios do tabuleiro superior nos pilares metálicos foram definidos usando um conjunto de barras de configuração estrutural bastante simples, mas que simulam corretamente o seu funcionamento.

Quanto aos apoios dos pilares de alvenaria e dos

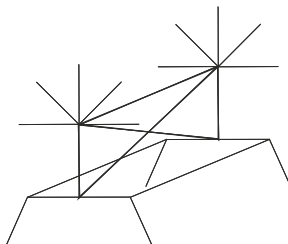
encontros, não houve necessidade de conceber um esquema estrutural que traduzisse a realidade, pois o próprio programa permite simulá-los corretamente. Assim se consideraram para aqueles, apoios simples, os 3 pilares metálicos foram considerados encastrados no terreno, o arco duplamente apoiado nas suas extremidades e o tabuleiro inferior igualmente.

### Modelação das longarinas de suporte dos carris

Apesar de, para o cálculo estático da ação do comboio, apenas serem consideradas forças aplicadas nos nós, definiu-se o “caminho” para o comboio, necessário para o caso do estudo dinâmico que posteriormente se efetuou. Consideraram-se, por isso, 4 longarinas de suporte dos carris nas quais se aplicaram as forças



Pilar metálico n.º 1 situado em Gaia, vista geral detalhes e esquema tipo “Pilar PP” entre o tabuleiro superior e o arco



Esquema dos apoios; apoio entre o tabuleiro superior e um pilar de alvenaria  
Apoio entre o tabuleiro superior e um pilar metálico

correspondentes à circulação simultânea de 2 comboios cruzando-se, uma das situações mais desfavoráveis para a estrutura. Refere-se no entanto que o estudo dinâmico do comboio foi efetuado num modelo 2D, mais simples e que traduz corretamente o comportamento da Ponte. Não tendo sido necessário o “caminho” previamente definido, de qualquer modo mantiveram-se as barras das longarinas pois não interferem no estudo efetuado, e a sua eliminação traria algumas dificuldades.

**Modelação da viga contínua constituída pelos tramos 1, 2, 3 e 4**

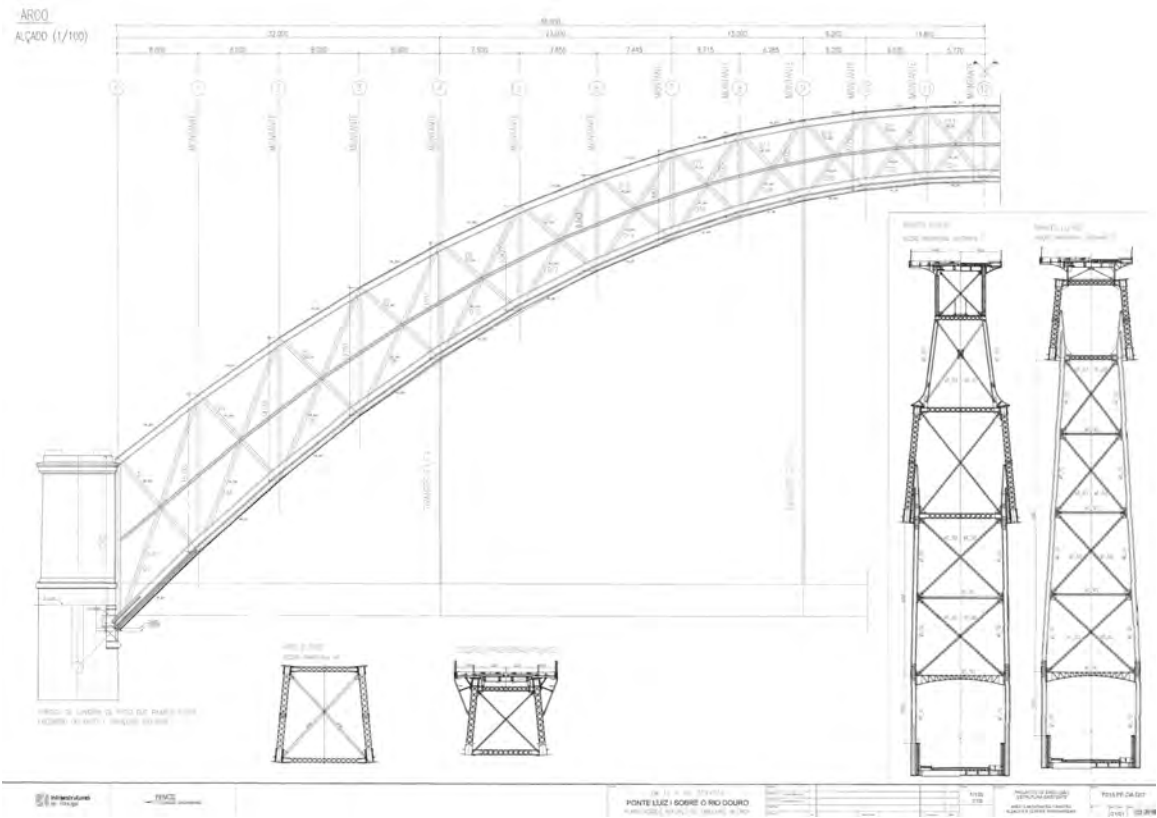
A parte do tabuleiro superior constituída pelos tramos 1, 2, 3 e 4 foi estudada em separado como Trelíça

Plana e Espacial e como viga contínua com 4 tramos de momentos de inércia constante.

Estas diferentes análises tinham a intenção de comparar resultados destas duas modelações com os da estrutura global, e ainda com o projeto original de modo a concluir tanto da fiabilidade dos resultados, como do modelo estrutural adotado.

**Agrupamento das sub-estruturas modeladas**

Após modeladas as diferentes partes da estrutura anteriormente mencionadas, juntaram-se formando a estrutura completa objeto do estudo. Formada a estrutura global atribuíram-se as respetivas características mecânicas a cada uma das barras.



# 3. Análises efetuadas

As análises dinâmicas referentes à circulação do comboio-tipo foram efetuadas, recorrendo a um modelo bidimensional da Ponte. Para tal, houve necessidade de efetuar algumas simplificações. Em termos gerais, pode dizer-se que as características mecânicas dos elementos intervinientes no modelo 2D eram duplas das do modelo 3D. Foi ainda necessário proceder à correção das diferentes massas e pesos específicos das secções-tipo.

Para algumas situações de carga fizeram-se algumas verificações dos deslocamentos ocorridos em ambos os modelos (2D e 3D) tendo-se obtido concordância entre os valores dos deslocamentos.

Este estudo tem como finalidade, além de obter os resultados em termos de esforços relativos à circulação do comboio, para diferentes velocidades de circulação, saber os respetivos coeficientes de amplificação dinâmica que possam surgir devidos a essa circulação. Pretendeu-se também avaliar a comodidade associada às diferentes velocidades.

Efetuiu-se ainda uma segunda comparação, desta vez interessando o modelo estático com tabuleiro inferior e sem tabuleiro inferior mas com as respetivas forças aplicadas no arco. Mais uma vez se verificou um reduzido erro entre os dois modelos, podendo afirmar-se a ótima prestação do modelo sem o tabuleiro inferior.

No que respeita ao modelo 3D com o tabuleiro inferior, pretendeu-se determinar os modos de vibração e encurvadura para as combinações mais desfavoráveis, podendo assim completar corretamente o estudo em curso, que uma obra desta importância obriga.

## Análise dos resultados

A apresentação dos resultados, uma vez obtidos os ficheiros de resultados referentes aos diferentes grupos de combinações de ações foi feita retendo-se para cada barra e para cada combinação apenas o esforço axial.

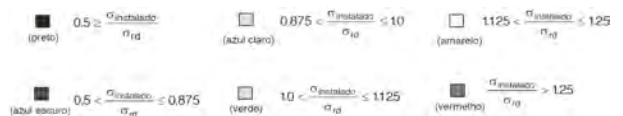
Em seguida, para cada grupo de combinações determinou-se a máxima tração e a máxima compressão

obtendo-se, assim, as envolventes de trações e de compressões, a seguir convertidas nas respetivas tensões. No que diz respeito às tensões de tração, foram obtidas meramente por divisão do valor do esforço axial pela respetiva área efetiva da barra. Quanto às barras comprimidas, para atender ao fenómeno da encurvadura, as tensões foram determinadas da seguinte forma:

- utilizaram-se as curvas europeias de varejamento, em que se admitiu para todas as barras a curva tipo D ;
  - na definição do coeficiente de esbelteza, utilizou-se a menor das inércias e o comprimento efetivo da barra, isto é, o comprimento entre dois nós consecutivos;
- assim definiu-se como tensão de compressão, o valor do esforço axial dividido pelo coeficiente de encurvadura e pela área efetiva da barra.

Atendendo a que é possível atuar sobre o valor desta tensão mediante a introdução de novas condições de contraventamento das peças comprimidas, igualmente se determinaram as tensões reais de compressão, isto é, não afetadas do coeficiente de encurvadura.

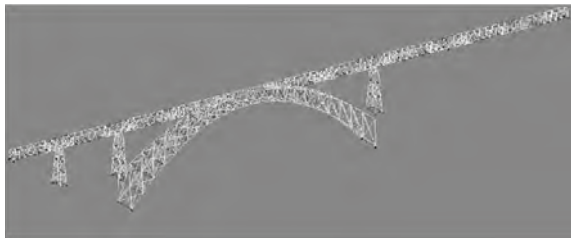
Numa segunda fase, elaborou-se um programa que gera o desenho da Ponte, colorindo as barras conforme a tensão nelas instalada. Os intervalos de tensão correspondentes a cada cor, idênticos para tração e compressão, foram adotados segundo o esquema seguinte:



A tensão  $\sigma_{rd}$ , usada para tensão de referência, foi obtida por majoração da tensão que, de acordo com a literatura especializada, é considerada como tensão admissível para aços de obras com idade idêntica à Ponte Luiz I, ou seja, a tensão de 105 MPa. Refira-se ainda que os ensaios experimentais efetuados com os provetes retirados da ponte confirmaram este valor.

$$\sigma_{rd} = 1.5 \times 105 = 157.5 \text{ MPa}$$

A apresentação dos resultados revelou-se muito sugestiva e a sua interpretação resulta bastante simplificada, tornando evidentes as barras cujas tensões estão próximas ou excedem o máximo admissível, ver figura abaixo.

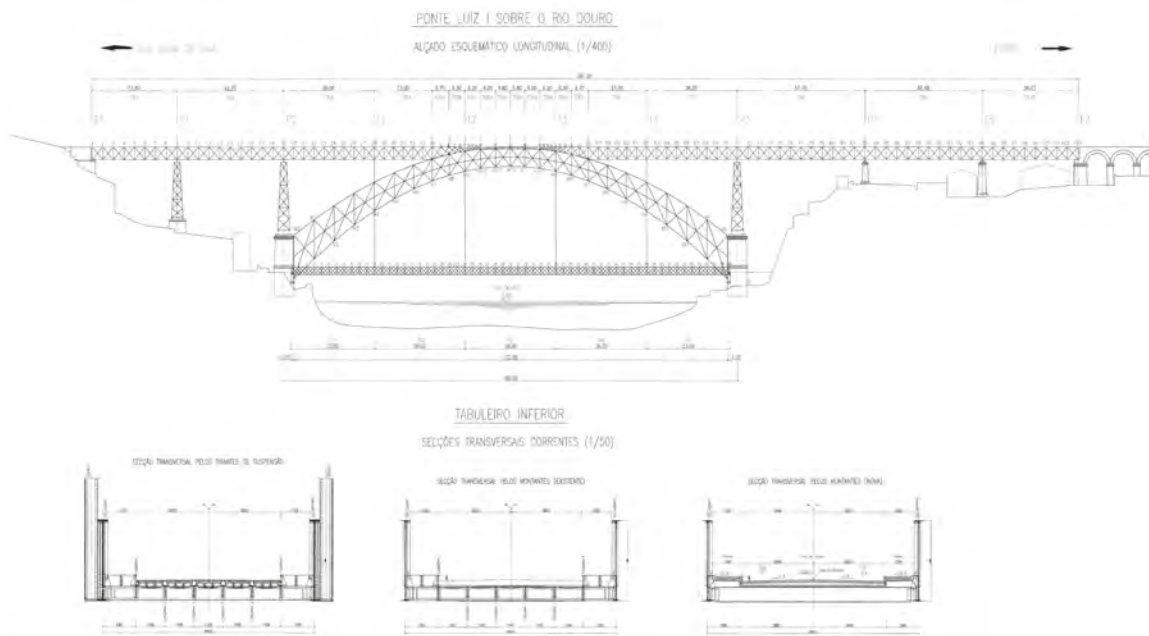


Os estudos efetuados permitiram evidenciar as barras da estrutura que era necessário reforçar e permitiu concluir que:

## É viável a passagem do Metro pela Ponte Luiz I

No entanto, a viabilidade fica condicionada pela satisfação dos pontos seguintes:

1. A tipologia das carruagens deveria ser semelhante à usada no estudo.
2. Deverão ser dimensionados e convenientemente executados os contraventamentos e/ou reforçadas as secções, de forma a serem eliminados os riscos de encurvadura detetados.
3. Deverá ser tido em conta que a vida remanescente de algumas peças em situação crítica é muito limitada pelo que deverão ser reforçadas para reduzir o nível geral de tensões.



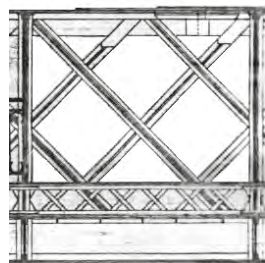
4. O estado de conservação da Ponte é em muitos locais precário e encontram-se focos importantes de corrosão que urge eliminar, pelo que é imperioso efetuar uma extensa intervenção de conservação.
5. Deverá ser feito um levantamento dos problemas de enfundamento que poderão existir em algumas peças. Este problema foi detetado em algumas barras sendo provável a existência de outras situações idênticas. Estas situações poderão agravar substancialmente as tensões, pelo que se torna necessário proceder a uma verificação completa da segurança estrutural da Ponte.
6. Os apoios da Ponte deverão ser revistos e eventualmente substituídos.
7. Para além das inspeção regular que uma estrutura deste tipo deve merecer, deverá nos primeiros tempos da nova utilização da estrutura, ser previsto um especial acompanhamento e inspeção da mesma de acordo com um plano a definir.
8. Deverá ser dada especial atenção aos pilares metálicos, dado que estes se revelaram como pontos críticos da estrutura, sendo necessário que estes pilares sejam convenientemente reforçados.
9. O nível de conforto dos peões para uma utilização intensiva da Ponte não é considerado aceitável, em determinados tramos e para determinadas velocidades de circulação, pelo que se recomenda a adoção de dispositivos de correção.
10. Deverão ser previstos dispositivos que evitem a permanência das pombas.

Na sequência deste estudo foi em 27 de Junho de 2003 encerrado ao trânsito o tabuleiro superior, para adaptação da estrutura ao metro ligeiro do Porto e a 18 de Setembro de 2005 é inaugurada a linha de metro e a passagem de peões no tabuleiro superior.

Em 2012, uma inspeção das Estradas de Portugal concluiu que a ponte precisava de obras de manutenção e reabilitação, nomeadamente ao nível do pavimento, juntas de dilatação, e pintura de vigas e guarda-corpos. Durante o mês de Agosto de 2013 foi realizada uma «manutenção regular no tabuleiro superior».

Em 2015 foi anunciado que irão ser construídos dois passeios de dois metros do lado de fora do tabuleiro inferior. Os transeuntes cruzarão o rio Douro pelo passadiço mais próximo das ribeiras, enquanto as bicicletas cumprirão o percurso pela travessia a montante. A construção dos passadiços suspensos custará cerca de 600 mil euros e necessita da autorização da Direção Regional da Cultura do Norte. Pelo valor patrimonial da Ponte Luiz I, pela sua identidade acrescida ao facto de ser Património da Humanidade espero sinceramente que este atentado ao património não seja efetivado.

Passados 130 anos da data da sua inauguração, a Ponte Luiz I continua a desempenhar um papel fundamental para as duas cidades que liga.



Projeto original da Ponte Luiz I, módulo estrutural do tabuleiro inferior

## 4. Fotografias de obra











