

arco circular de raio 4000m



# Sbo

Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projeto à obra

#12, maio 2017

Ponte do Infante - projeto e obra

Porto

António Adão da Fonseca  
Renato Bastos



**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**

Os autores

**Créditos Fotográficos**

Os 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 12. Ano III, maio 2017

**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.

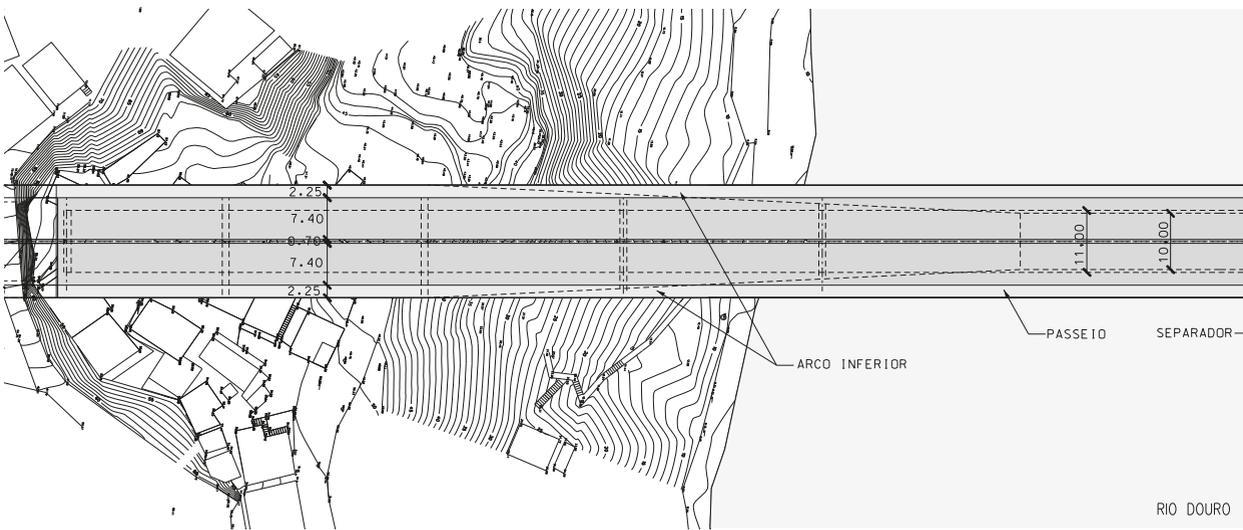
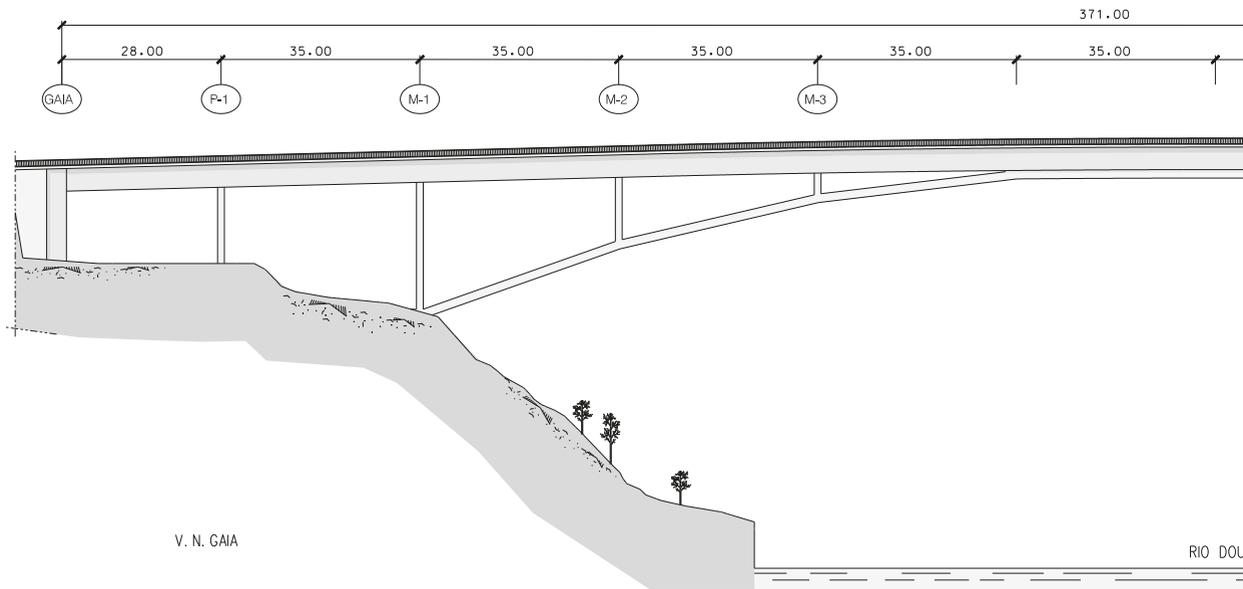
**Editorial.** Na décima segunda edição da **Sebentas d’Obra** estudamos mais uma das pontes do Porto, a Ponte do Infante. A Ponte do Infante surge por ocasião do “nascimento” do Metro do Porto, para substituir a passagem viária da Ponte Luiz I, que seria ocupado pelo Metro. Esta ponte, que faz a ligação entre as Fontainhas e a Av. D. João II em Gaia, está entre as duas pontes contruídas mais antigas, a Ponte Luiz I e a Ponte Maria Pia, o que foi, desde logo um desafio para a equipa projetista liderada pelo Prof. Adão da Fonseca e desenvolvida pelo Eng. Renato Bastos.

O enquadramento entre duas magníficas Obras de Arte metálicas, foi o mote para procurar encontrar uma solução que acima de tudo respeitasse esta paisagem histórica e urbana, Património Mundial, pela sua simplicidade e respeito pela envolvente onde se insere. Citando os autores, a ponte teria de “enfrentar no desmedido a medida e libertar da confusão o simples”. Com um gesto de enorme humildade, procurou-se um desenho quase linear que permitisse enquadrar as pontes vizinhas, apoiando-se nas cotas altas das duas encostas. Estes dois princípios viriam a ser determinantes para tornar esta ponte um recorde Mundial no chamado coeficiente de “arrojo”, carinhosamente batizado pelo Prof. Adão da Fonseca, isto é, na menor relação entre a flecha (distância vertical ente os apoios e a altura máxima do arco) e o vão (distância horizontal entre os arranques dos apoios).

Na visita vamos poder andar pelo interior desta ponte, uma enorme viga com mais de 6m de altura. Na palestra o Prof. Adão da Fonseca, reconhecido internacionalmente como um dos melhores projetistas de pontes, dar-nos-á conta do desenvolvimento deste projeto e desta obra, bem como de todas as pontes que fizeram do Porto a cidade Invicta, da forma como o Porto e Vila Nova de Gaia cresceram depois da construção de cada uma e da importância das Pontes do Futuro que ainda estão por vir.

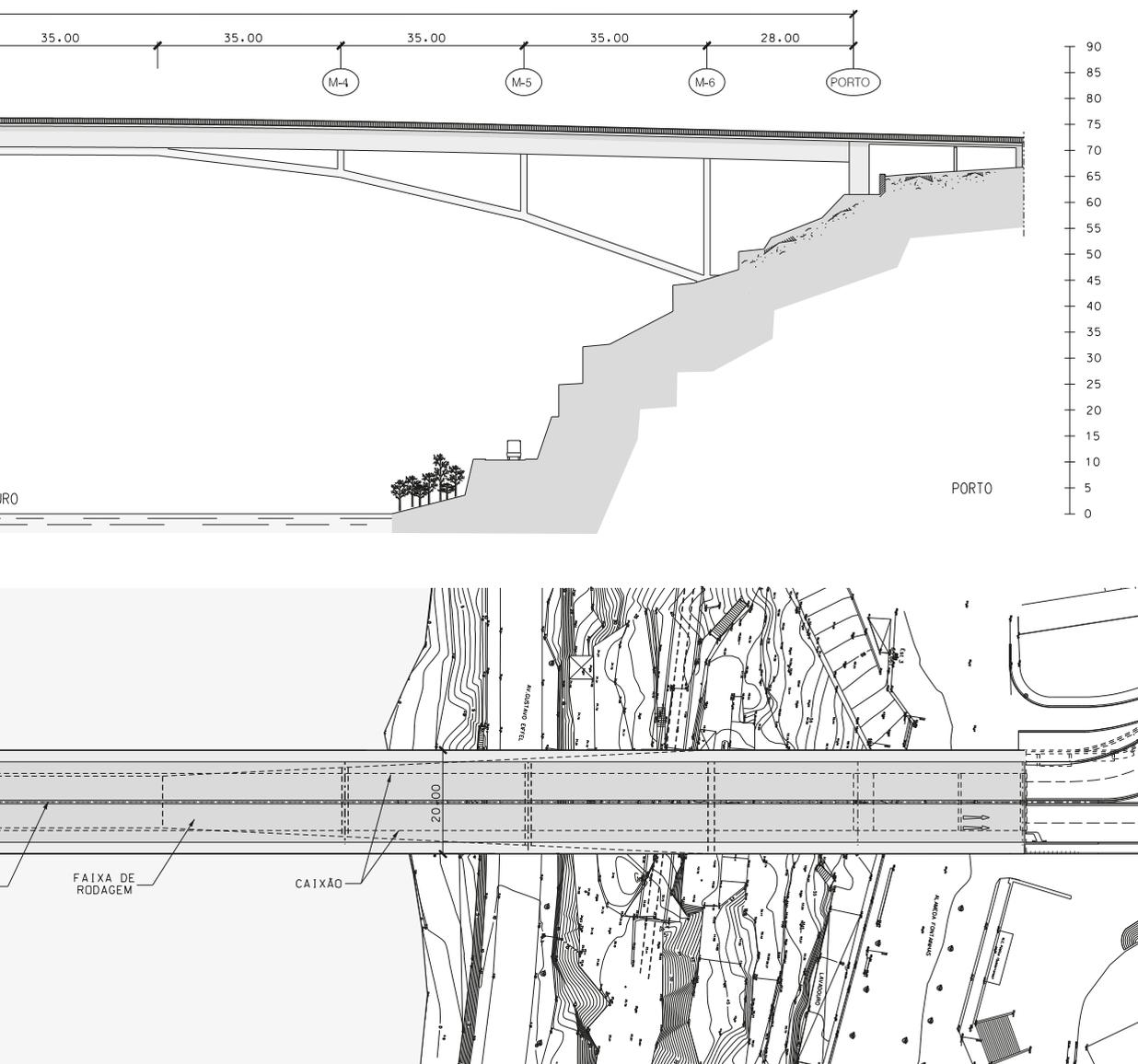
Bárbara Rangel  
Porto, 11 maio 2017

# Ponte Infante D. Henrique - uma ponte inovadora



Entre o Porto e o Porto, há as pontes. Marcos do tempo. Traços que cortam o constante serpentear do rio, cada um à sua maneira, um destino sustentado pela força do cálculo que moldou e torceu betão, ferro, arcos, pilares. O Douro, com a fome de mar, cavou no granito o desafio para super-homens. Edgar Cardoso, Gustave Eiffel, Théophile Seyrig deram-lhe a forma. Construíram pontes que andam lá no alto, seres das nuvens com pés de alfinete. Quem se afeiçoa a estes monstros, dá-lhes o carinho de terem traços de gente. A Arrábida, uma gentil bailarina; Luís I, os bigodes armados de um "gentleman" de Oitocentos; D. Maria, a saia arcada de uma dama que pula sobre um ribeiro; e S. João, uma garça de finas patas...

PONTES, David. *A cidade das Pontes*. Contexto, Editora, 2000.



# 1. Introdução

O concurso de concepção e construção da Ponte Infante D. Henrique, sobre o rio Douro, ligando as cidades do Porto e de Gaia e localizada a meio caminho entre a ponte Luiz I e a ponte Maria Pia, estimulava, de uma forma bem explícita, a uma concepção cujas qualidades técnicas e estéticas teriam de ombrear com aquelas duas pontes, qualquer delas grandes obras de Engenharia e que são atualmente componentes obrigatórias da paisagem citadina que, no final do século XX, viu o seu valor excepcional consagrado com a elevação do núcleo urbano adjacente à categoria de Património Mundial. A responsabilidade em conceber uma tal Ponte era ainda acrescida pelo facto de ela ter sido batizada com o nome de Infante D. Henrique, sem dúvida um dos mais ilustres filhos da cidade do Porto e de Portugal e que liderou a Europa na aventura de ir ao encontro de outras Civilizações.

## O rio Douro

O rio Douro nasce bem dentro da Espanha, na serra de Urbion, já quase a cair para o vale do rio Ebro, para onde inicialmente parece dirigir-se. Mas depois de se enriquecer com os aromas dos vinhos de "Rioja" e como que a evitar uma difícil discussão com o rio Ebro sobre qual seria o afluente do outro, opta por virar para Ocidente e decide atravessar a Península Ibérica, em direção a Portugal. Ainda dentro da Espanha começa a cavar nos granitos e xistos os desfiladeiros espetaculares que, de Norte para Sul e ao longo de mais de 100 quilómetros, constituem fronteira entre os dois países.

Ao receber o rio Tormes, com quem aconchega as terras dos excelentes vinhos de "Ribera del Duero", decide definitivamente inflectir para Ocidente e entrar em Portugal para à sua volta criar o microclima e dar à terra o cheiro em que todos os anos nasce o "vinho supremo". Embora atingida uma tal perfeição, o objetivo de qualquer rio é chegar ao mar, e portanto não se estranha que o rio Douro, antes de o terem disciplinado

com sucessivas barragens, aumentasse a velocidade das suas águas para mais depressa chegar ao Porto. E se é no Porto que o rio realiza o seu sonho, então compreende-se que ao "vinho supremo" se chame "Vinho do Porto".

No último quilómetro do curso do rio Douro que antecede a chegada à cidade antiga do Porto e às caves do Vinho do Porto, as margens levantam-se com grande altivez no poder das rochas graníticas que orgulhosamente se debruçam sobre o rio Douro. Pois é neste contexto que o génio de dois grandes Engenheiros do século XIX, Gustavo Eiffel e Théophile Seyrig, realizaram duas pontes magníficas. Duas belíssimas pontes em arco que estão localizadas precisamente à entrada e à saída daquele quilómetro, como que em vénia ao rio Douro. Ao não lhe tocarem, mesmo em situação de cheia, contemplam sempre em respeito a passagem de águas tão nobres.

## A Ponte

Na Europa tem florescido uma tendência para conceber pontes repletas de meios de expressão desnecessários e decorativos, onde o único que triunfa é a retórica da ornamentação. Mas a Ponte Infante D. Henrique nasce antes de um discurso técnico rigoroso, embora sem renunciar a que a sua resolução constitua uma obra de total harmonia e dignidade.

Dizia o Professor Fernández Ordoñez que, num momento em que os meios de cálculo e as tecnologias de construção permitem praticamente tudo, perante a grande confusão de formas, tipologias e imagens, o objetivo da solução para esta Ponte tinha de evitar qualquer excesso formal e alcançar com a sua estrutura a essência, isto é, enfrentar no desmedido a medida e libertar da confusão o simples.

*la simplicité n'est pas un but dans l'art, mais on arrive à la simplicité malgré soi en s'approchant du sens réel des choses*

Brancusi

As características conceptuais mais importantes do projeto da Ponte Infante D. Henrique são as seguintes:

- Um grande respeito ao rio e às magníficas pontes históricas do Porto, tanto as antigas como as mais recentes. Isto significa que a nova Ponte não tenta competir com elas, mas sim tenta trazer uma nova solução formalmente discreta e elegante, ainda que de grande pureza técnica e de vanguarda hoje no mundo, tanto na sua conceção como na sua execução;
- Um grande respeito à cidade e ao seu particular perfil que se recorta no céu, evitando colocar elementos estruturais que se elevem sobre a rasante da Ponte. A solução é muito simples e neutra para a cidade, sem

renunciar a um discurso técnico de vanguarda. Mas uma técnica que fica discretamente no seu lugar, sem aparecer aparatosamente, não ao serviço de uma pretendida “nova imagem” nem de um novo “adorno” urbano. O Porto não necessita de mais símbolos ornamentais e menos ainda quando são tecnicamente desnecessários.

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 pura e abstrata, quase musical, afastada tanto do convencional como do ornamental.

Um arco singular e esbeltíssimo de grande vão, que



Fig. 1. Alçado da Ponte em final de construção.

se apoia de um modo natural e harmonioso nas zonas altas rochosas das ladeiras, projetando uma Ponte cujo tabuleiro tem no perfil do desenho uma força maior do que o arco.

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, da pureza estrutural e da regularidade geométrica.

Especial atenção foi ainda dada à iluminação, às guardas e ao separador central. Os guarda-corpos tem no seu desenho o espírito “minimal” da Ponte, reduzindo-se às suas formas simples e funcionais. Integrado nestes guarda-corpos, na estrutura do guarda-rodas e no separador central, situa-se a iluminação funcional, colocada a cota baixa, permitindo a iluminação dos percursos. Sem acrescentar formas verticais desnecessárias e sem

interferir com a visibilidade noturna que proporciona a sua travessia.

A iluminação de carácter exclusivamente decorativo resume-se a uma iluminação sob o arco, acentuando apenas o seu arranque junto às escarpas e diluindo-se no sentido do seu comprimento. Mas claro, a iluminação superior tem, em si mesmo, um elevado valor decorativo.

A Ponte acentua 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.

*A Sé via-se já de flanco. No empedrado do terreiro, os passos crepitavam. Só o barulho das motorizadas conseguia atravessar tanto silêncio. As colinas de Gaia estão cheias de luzes coadas por uma neblina rala, que jamais se extingue. Não há nenhuma cidade, assim, que subitamente se não torne secreta. No rio, junto do cais, distinguem-se dois ou três barcos de carga, no meio do tremor mercantil dos anúncios luminosos. No negrume dos telhados, quebrado nas ruas mais próximas quase só pela brancura de uns lençóis a secar às janelas, rompem as agulhas das igrejas - lancinantes.”*

Eugénio de Andrade

“DUAS CIDADES” - São Lázaro, 1967

O projeto da Ponte Infante D. Henrique foi desenvolvido por uma equipa que incluiu, além do primeiro autor deste texto, os professores engenheiros José Antonio Fernández Ordóñez e Francisco Millanes Mato, da IDEAM, SA, os engenheiros Renato Bastos, Pedro Fradique Morujão e Luís Pedro Moás, da AFAssociados - Projectos de Engenharia, SA, os engenheiros Luís Matute Rubio, Javier Pascual Santos e Arturo Castellano Ortuño, também da IDEAM, e, como especialistas em geotecnia, os engenheiros José António Mateus de Brito e José Manuel Romeiro, da CENOR - Projectos de Engenharia, Lda. Por outro lado, tratou-se de uma obra de conceção/construção ganha em concurso internacional pelo consórcio formado pelas empresas EDIFER - Construções, SA e NECSO - Entrecanales y Cubiertas, SA, tendo como diretor geral o engenheiro João Paiva e como diretor de obra o engenheiro Ignácio Poviña.



Fig. 2. Alçado da Ponte já construída, vista do tabuleiro inferior da ponte Luiz I.

# 2. A estrutura

A Ponte do Infante é constituída por dois elementos fundamentais em interação mútua: uma viga caixão, muito rígida, em betão armado pré-esforçado, de 4,50 m de altura, apoiada sobre um arco muito flexível, em betão armado, com 1,50 m de espessura, conforme alçado e cortes transversais apresentados na Fig. 3. 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 de abatimento superior a 11.

Nos 70 m centrais da estrutura, o arco une-se 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.

O comportamento da estrutura é determinado pela relação que se estabelece entre esses dois elementos de rigidez tão desigual. A Ponte afasta-se do funcionamento clássico de uma ponte de arco rígido, trabalhando

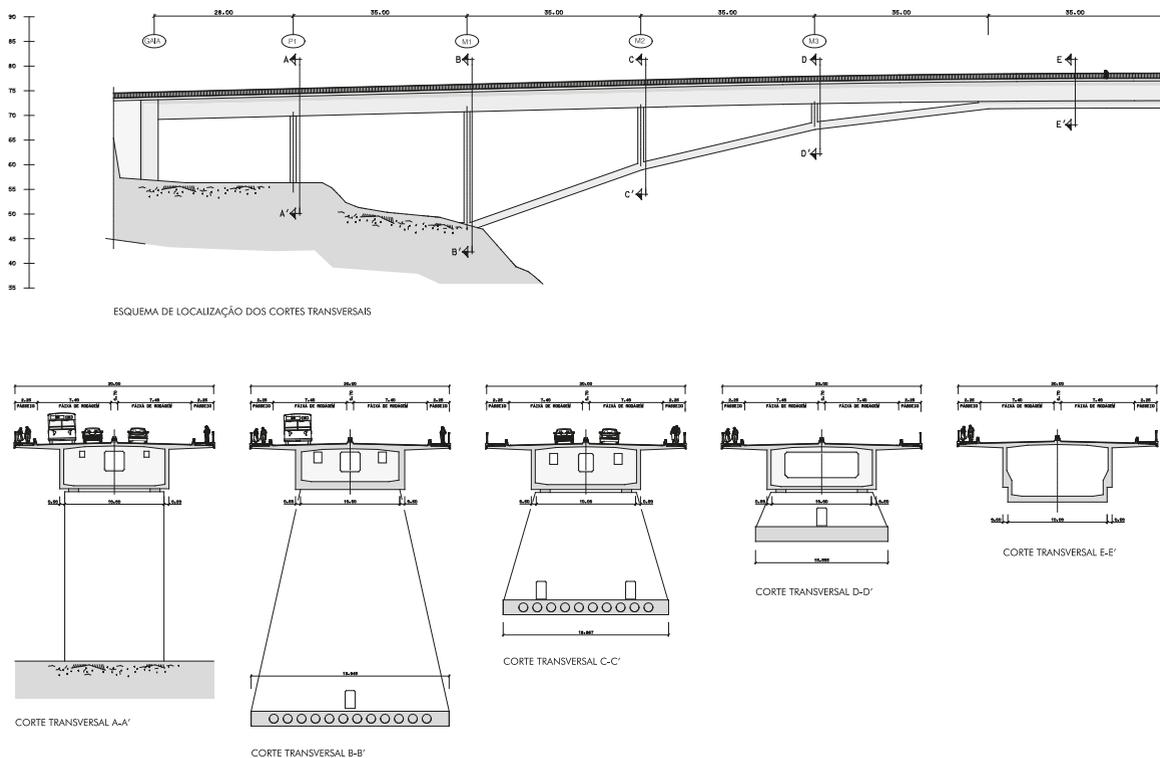


Fig. 3. Dimensões gerais da Ponte.

este basicamente à compressão. Um tal arco liberta de flexões o tabuleiro ou reduz as flexões apenas às distâncias entre montantes.

Na Ponte Infante D. Henrique, a grande rigidez do tabuleiro face ao arco, aliada ao forte abatimento deste, aproxima o funcionamento da estrutura da Ponte ao de uma ponte em que o tabuleiro vence o vão completamente por flexão, tal como numa ponte contínua convencional, mas proporcionando ao arco vários apoios elásticos intermédios através dos montantes afastados de 35 m entre si.

O grande abatimento do arco encontra-se claramente fora do âmbito aconselhável para pontes, cujas relações de abatimento se recomenda estejam entre 5 e 10. Acima deste limite, incrementam-se de forma rápida os esforços axiais no arco, assim como as flexões geradas pelas cargas móveis, pelos possíveis assentamentos diferenciais e pelos 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 espessura constante, responde ao incremento de esforços axiais do fecho até aos arranques ao aumentar linearmente a sua largura desde os 10 m no tramo central até 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 durante os avanços em consola, na sua construção.

A Ponte Infante D. Henrique, além de possuir qualidades formais e estéticas indiscutíveis, representa um enorme avanço tecnológico que começa na magnitude das suas dimensões mas que se pode reconhecer no conjunto dos

pontos seguintes:

- é o segundo maior arco europeu em betão; com um vão  $L = 280$  m, só é superada pela Ponte de Krk, na Croácia, construída em 1979 e que, com o vão de 390 m, foi record mundial durante 18 anos, até 1997;
- é o record mundial na tipologia de arco laminar; com uma espessura constante de 1,50 m (aproximadamente  $L/187$ ), distingue-se por ser extremamente esbelto em relação aos valores habituais das soluções convencionais de arco rígido (ente  $L/40$  e  $L/60$ ); a flecha  $f = 25$  m traduz-se num grande abatimento ( $L/f = 11,2$ ) do arco que não tem paralelo no âmbito das pontes de grande vão;
- o seu “coeficiente estático” ( $L^2/f > 3000$ ), diretamente proporcional ao esforço axial instalado no coroaamento do arco (Fig. 4), é o maior de todos os arcos de betão até hoje construídos.

Podem dizer-se que se está perante o arco de betão mais solicitado e, também, mais “delicado” de todo o mundo. Apesar de ser um record mundial em esbelteza, nele está instalado o maior esforço axial de todos os arcos alguma vez construídos.

Evidentemente, uma ponte inspirada nas obras de arte projetadas pelos brilhantes Engenheiros Suíços Robert Maillart e Christian Menn, do primeiro referindo-se a Ponte de Valterschielbach, construída em 1925 e com um vão de 43 m, e do segundo referindo-se a Ponte de Hinterrhine, na Garganta de Viamala, e as duas Pontes sobre a torrente de Moesa, na encosta sul do Passo São Bernardino, construídas na segunda metade do século XX e as últimas com vãos de 112 m.

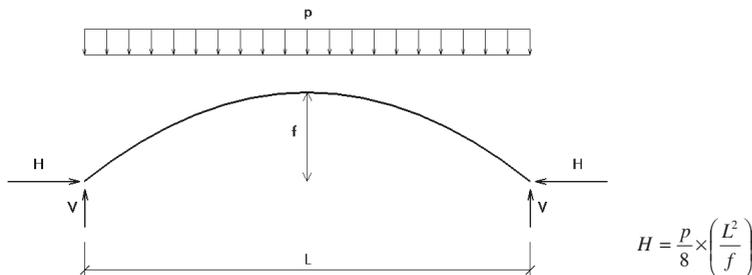


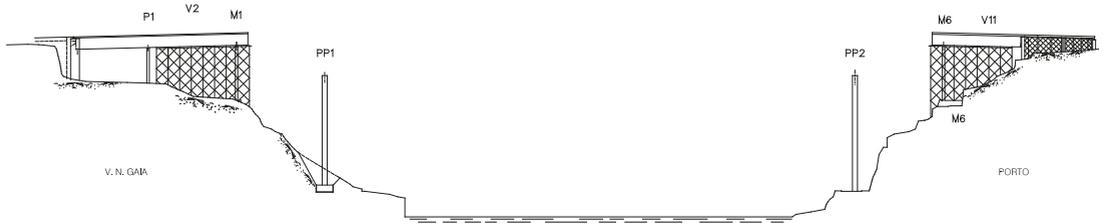
Fig. 4. Resposta estrutural de um “arco perfeito”.



- FASE 0 .-**
- \* EXECUÇÃO DAS FUNDAÇÕES E DA ELEVAÇÃO DOS ENCONTROS DO PORTO, DE GAIA E DAS FONTAÍNHAS.
  - \* EXECUÇÃO DA ESCORA E1 E DO PILAR P1.
  - \* EXECUÇÃO DE ANCORAGENS AO TERRENO NO PORTO E EM GAIA.
  - \* EXECUÇÃO DAS SAPATAS DO ARCO.
  - \* EXECUÇÃO DAS SAPATAS DOS PILARES PROVISÓRIOS.



- FASE 1 .-**
- \* EXECUÇÃO DO TRAMO V1 DO TABULEIRO, COM CIMBRE AO SOLO.
  - \* INÍCIO DA EXECUÇÃO DA LAJE DAS FONTAÍNHAS E DO TRAMO V11 DO TABULEIRO, COM CIMBRE AO SOLO.
  - \* EXECUÇÃO DAS ESCORAS E2 E E3.
  - \* EXECUÇÃO DOS MONTANTES M1 E M6.
  - \* EXECUÇÃO DOS PILARES PROVISÓRIOS PP1 E PP2.
  - \* EXECUÇÃO DO AVANÇO DO TRAMO V2, COM CIMBRE AO SOLO.



- FASE 2 .-**
- \* EXECUÇÃO DO TRAMO V2 DO TABULEIRO, ENTRE O PILAR P1 E O MONTANTE M1, COM CIMBRE AO SOLO.
  - \* CONCLUSÃO DO TRAMO V2 E EXECUÇÃO DO AVANÇO DO TRAMO V3, COM CIMBRE AO SOLO.
  - \* EXECUÇÃO DA LAJE DAS FONTAÍNHAS E DO TRAMO V11 DO TABULEIRO, COM CIMBRE AO SOLO.
  - \* CONCLUSÃO DO TRAMO V11 E EXECUÇÃO DO AVANÇO DO TRAMO V10, COM CIMBRE AO SOLO..
  - \* MONTAGEM DOS CARROS DE AVANÇOS NAS PRIMEIRAS ADUELAS BETONADAS DOS TRAMOS V3 E V10 DO TABULEIRO.



- FASE 3 .-**
- \* INÍCIO DA COLOCAÇÃO DOS CABOS DE RETENÇÃO R1, R2, R5 E R6, DEIXANDO PREPARADAS AS CABEÇAS ACTIVAS PARA EFECTUAR AS OPERAÇÕES DE TENSIONAMENTO DE CADA CABO, AO LONGO DAS FASES CONSTRUTIVAS SUCESSIVAS
  - \* EXECUÇÃO DO TRAMO V3 DO TABULEIRO E DO TRAMO A1 DO ARCO, ENTRE OS MONTANTES M1 E M2.
  - \* EXECUÇÃO DO TRAMO V10 DO TABULEIRO E DO TRAMO A6 DO ARCO, ENTRE OS MONTANTES M6 E M5.
  - \* A EXECUÇÃO É FEITA POR ADUELAS SUCESSIVAS, ATRANTANDO-SE O ARCO DOS SEPTOS SM1 E SM6, SOBRE OS MONTANTES M1 E M6, RESPECTIVAMENTE, COM BARRAS.
  - \* O PROCESSO AVANÇA ATÉ À EXECUÇÃO DAS ADUELAS SEGUINTE AOS PILARES PROVISÓRIOS PP1 E PP2 (VER PORMENOR 1, PARTICULARIZADO PARA O LADO DE GAIA).
  - \* ESTICAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DOS CABOS DE RETENÇÃO R1, R2, R5 E R6.



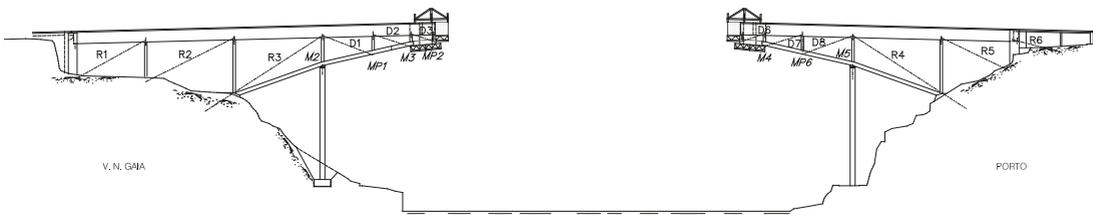
- FASE 4 .-**
- \* EXECUÇÃO DOS MONTANTES M2 E M5 (VER PORMENOR 1, PARTICULARIZADO PARA O LADO DE GAIA).
  - \* LEVANTAMENTO DO TABULEIRO COM MACACOS HIDRÁULICOS COLOCADOS SOBRE OS MONTANTES M2 E M5 PARA ALTERAÇÃO DOS ESFORÇOS DE FLEXÃO NO TABULEIRO, APLICANDO FORÇAS ASCENDENTES DE 9000 kN.
  - \* LEVANTAMENTO DO CONJUNTO ARCO-MONTANTE-TABULEIRO COM MACACOS HIDRÁULICOS COLOCADOS SOBRE OS PILARES PROVISÓRIOS PARA CORRECÇÃO DA GEOMETRIA DA PONTE, APLICANDO FORÇAS ASCENDENTES DE 5000 kN.



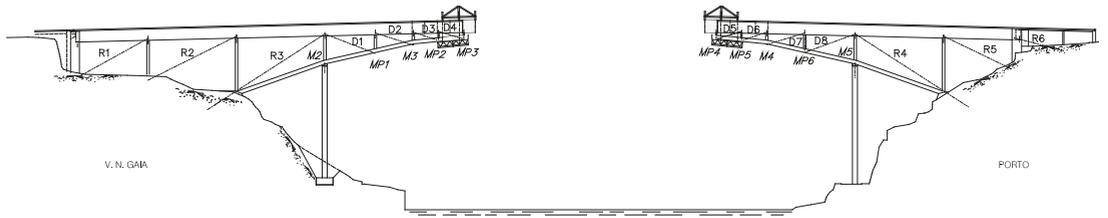
- FASE 5 .-**
- \* AVANÇO DOS CARROS ENTRE OS MONTANTES M2 E M3, ATÉ Atingir 5 ADUELAS COMPLETAS NO TRAMO V4 DO TABULEIRO (24.40m DESDE O EIXO DO PILAR PROVISÓRIO), E 5 ADUELAS COMPLETAS DO TRAMO A2 DO ARCO (VER PORMENOR 2).
  - \* O ARCO VAI FICANDO SUSPENSO DO TABULEIRO COM BARRAS VERTICAIS.
  - \* EXECUÇÃO DOS TRAMOS V9 DO TABULEIRO E A5 DO ARCO, EXACTAMENTE COMO O FORAM OS TRAMOS V4 DO TABULEIRO E A2 DO ARCO.
  - \* COLOCAÇÃO DOS MONTANTES PROVISÓRIOS MP1 E MP6.
  - \* COLOCAÇÃO DAS DIAGONAIS D1 E D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R3 E R4, NESTES ÚLTIMOS DEIXANDO PREPARADAS AS CABEÇAS ACTIVAS PARA EFECTUAR AS OPERAÇÕES DE TENSIONAMENTO.
  - \* TENSIONAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DAS DIAGONAIS D1 E D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R1 A R6, DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA.



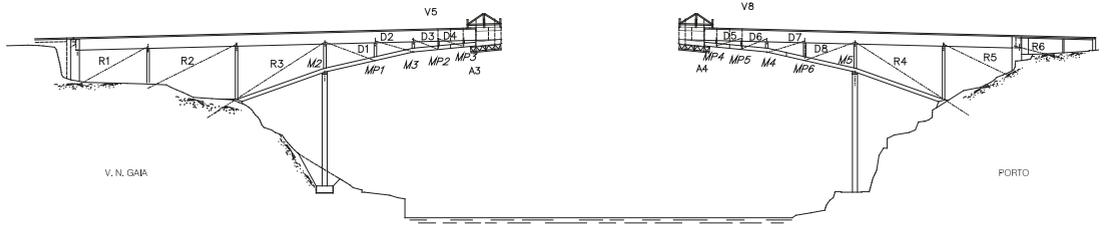
- FASE 6 .-**
- \* AVANÇO DO TABULEIRO E DO ARCO, POR ADUELAS SUCESSIVAS, ATÉ PASSAR ALÉM DOS MONTANTES M3 E M4 (VER PORMENOR 3, PARTICULARIZADO PARA O LADO DE GAIA).
  - \* COLOCAÇÃO DAS DIAGONAIS D2 E D7.
  - \* TENSIONAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DAS DIAGONAIS D1, D2, D7 E D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R1 A R6, DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA.



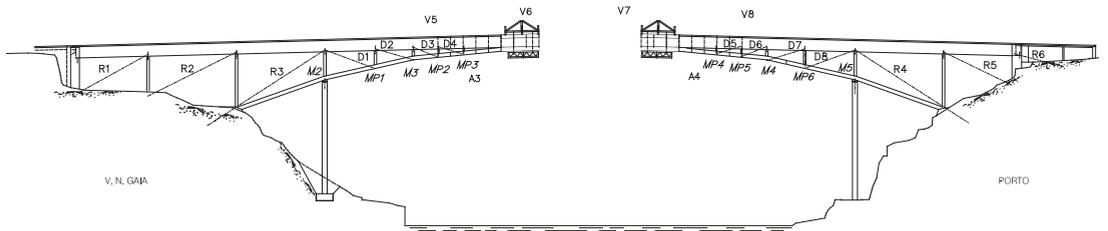
- FASE 7a .-**
- \* EXECUÇÃO DAS DUAS ADUELAS SEGUINTES AOS MONTANTES M3 E M4, TANTO NO TABULEIRO COMO NO ARCO.
  - \* COLOCAÇÃO DOS MONTANTES PROVISÓRIOS MP2 E MP5 (VER PORMENOR 4, PARTICULARIZADO PARA O LADO DE GAIA).
  - \* COLOCAÇÃO DAS DIAGONAIS D3 E D6.
  - \* TENSIONAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DAS DIAGONAIS D1, D2, D3, D6, D7 E D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R1 A R6, DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA.



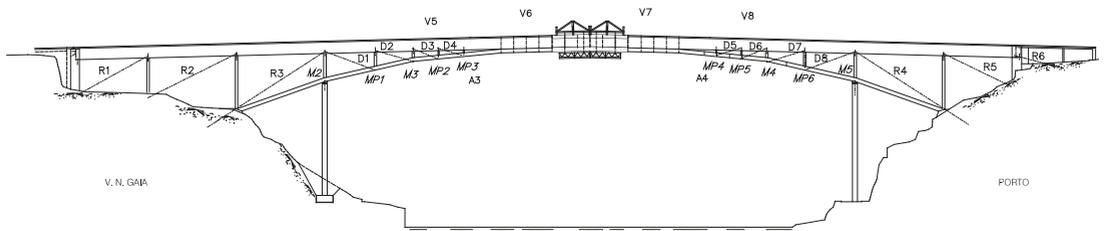
- FASE 7b .-**
- \* EXECUÇÃO DAS DUAS ADUELAS SEGUINTE.
  - \* COLOCAÇÃO DOS MONTANTES PROVISÓRIOS MP3 E MP4.
  - \* COLOCAÇÃO DAS DIAGONAIS D4 E D5.
  - \* TENSIONAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DAS DIAGONAIS D1 A D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R1 A R6, DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA



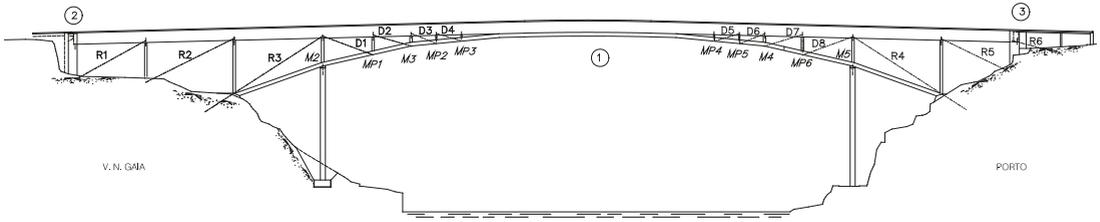
- FASE 8 .-**
- \* EXECUÇÃO DAS RESTANTES ADUELAS, ATÉ ALCANÇAR A ZONA DE UNIÃO TABULEIRO/ARCO (VER PORMENOR 5, PARTICULARIZADO PAR O LADO DE GAIA).
  - \* TENSIONAMENTO DAS UNIDADES NECESSÁRIAS DAS DIAGONAIS D1 A D8 E DOS CABOS DE RETENÇÃO R1 A R6, DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA



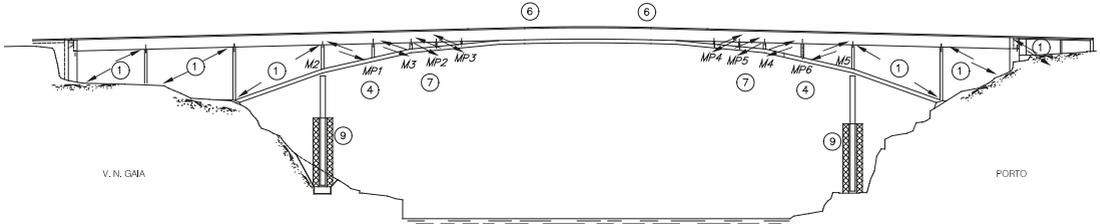
- FASE 9 .-**
- \* EXECUÇÃO DE TRÊS ADUELAS, POR AVANÇOS SUCESSIVOS, ATÉ ALCANÇAR 15.00m DE CADA LADO DO TRAMO CENTRAL.
  - \* APLICAÇÃO DE UM ASSENTAMENTO DE APOIO DE 16mm SOBRE OS PILARES PROVISÓRIOS, DE MODO A ALTERAR OS ESFORÇOS NO TABULIRO NA ZONA DE APOIO SOBRE OS MONTANTES E SOBRE OS PILARES PROVISÓRIOS.



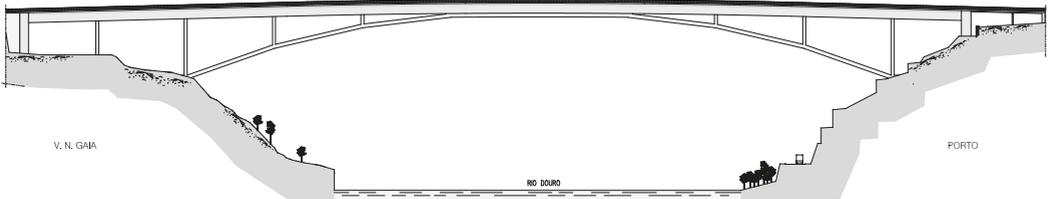
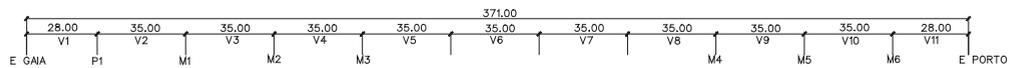
- FASE 10 .-**
- \* EXECUÇÃO DAS ADUELAS, POR AVANÇOS SUCESSIVOS, ATÉ AO FECHO DO TABULEIRO/ARCO.
  - \* DURANTE O AVANÇO DAS ADUELAS, ACTUA-SE SOBRE AS DIAGONAIS E OS CABOS DE RETENÇÃO DE MODO A CONTROLAR AS DEFORMAÇÕES E OS ESFORÇOS NA ESTRUTURA.



- FASE 11 .-
- ① BETONAGEM DO ESPESSAMENTO DO BANZO INFERIOR NO TRAMO CENTRAL DO TABULEIRO/ARCO.
  - ② LIBERTAÇÃO DOS APOIOS HORIZONTAIS NOS ENCONTROS.



- FASE 12 .-
- ① LIBERTAÇÃO DOS CABOS DE RETENÇÃO.
  - ② DESACTIVAÇÃO DAS ANCORAGENS AO TERRENO.
  - ③ RETIRADA DAS BARRAS DE SUSPENSÃO DO ARCO ENTRE OS MONTANTES M1 E M3 E M4 E M6.
  - ④ RETIRADA DOS MONTANTES PROVISÓRIOS MP1 E MP6, E DAS DIAGONAIS PROVISÓRIAS D1, D2, D7 E D8.
  - ⑤ COLOCAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO INFERIOR ENTRE OS MONTANTES M2 E M5 E AS UNIÕES TABULEIRO/ARCO DOS RESPECTIVOS LADOS (CABOS I5, I6, I105 E I106).
  - ⑥ RETIRADA DOS CABOS DE PRÉ-ESFORÇO PROVISÓRIO NO TABULEIRO.
  - ⑦ RETIRADA DOS MONTANTES PROVISÓRIOS MP2 A MP5, E DAS DIAGONAIS PROVISÓRIAS D3 A D6.
  - ⑧ RETIRADA DAS BARRAS DE SUSPENSÃO DO ARCO ENTRE OS MONTANTES M3 E M4 E AS UNIÕES TABULEIRO/ARCO DOS RESPECTIVOS LADOS.
  - ⑨ DEMOLIÇÃO DOS PILARES PROVISÓRIOS, CORTANDO-OS PELA BASE, SUSPENDENDO-OS DE TORRES PROVISÓRIAS E RODANDO-OS PARA O SOLO.
  - ⑩ APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO FINAL DE REFORÇO (CABOS S14, I4, I7, S114, I104 E I107).



- FASE 13 .-
- \* COLOCAÇÃO DE GUARDA-CORPOS E PASSEIOS.
  - \* PROVA DE CARGA.
  - \* ACABAMENTOS FINAIS.

# 3. O processo construtivo

Definitivamente, um arco tão abatido e tão esbelto só pode funcionar estruturalmente em conjunto com o tabuleiro. Na realidade, a Ponte é “muito” uma ponte em viga. Então, os processos construtivos clássicos de pontes em arco não serão os mais apropriados. Pelo contrário, se a Ponte é “muito” uma ponte em viga, os processos construtivos de tais pontes serão os mais convenientes.

Em fase de concurso, foi proposto um sistema de construção que envolvia a colocação de torres de atirantamento simultâneo do tabuleiro e do arco, mas reconhecer-se-á que é intrinsecamente pouco lógico construir primeiro uma ponte atirantada e depois transformá-la numa ponte em arco (Fig. 5).

Ao iniciar-se o projeto de execução da Ponte, o processo construtivo foi repensado e foi adotado o descrito neste texto, pelo qual se construiu “apenas uma ponte”.

Em termos gerais, o processo construtivo consistiu no avanço da estrutura a partir de cada uma das margens mediante a execução de dois pilares provisórios de modo a diminuir o vão em fase construtiva para 210 m, e a colocação de diagonais e montantes provisórios (a somar aos definitivos) entre o tabuleiro e o arco, de modo a formar duas consolas de inércia variável em

que o tabuleiro era o banzo traccionado, o arco era o banzo comprimido e as diagonais e os montantes eram “as almas”.

Na realidade, esteve-se perante duas estruturas trianguladas de altura considerável que se sustentaram em consola até à materialização do fecho do arco, conforme sequência apresentada na Fig. 6.

Para o exterior do arco definiram-se igualmente estruturas trianguladas envolvendo o tabuleiro, os encontros, o pilar P1 (do lado de Gaia - Fig. 7), escoras em betão armado, trabalhando em compatibilidade com os maciços rochosos, e diagonais.

Os montantes provisórios foram realizados em aço e as diagonais eram constituídas por cabos de pré-esforço cuja sequência de colocação permitiu regular a força instalada de forma a corrigir em cada fase a resposta da estrutura.

Com as estruturas trianguladas no exterior do arco pretendeu-se, afinal, transmitir às fundações as forças de tração instaladas no tabuleiro sobre os montantes na vertical dos pilares provisórios, e tal foi feito essencialmente por meio de diagonais, nesta função designadas por cabos de retenção, que “agarram” o tabuleiro às sapatas dos encontros, do pilar P1 e dos arranques do arco.

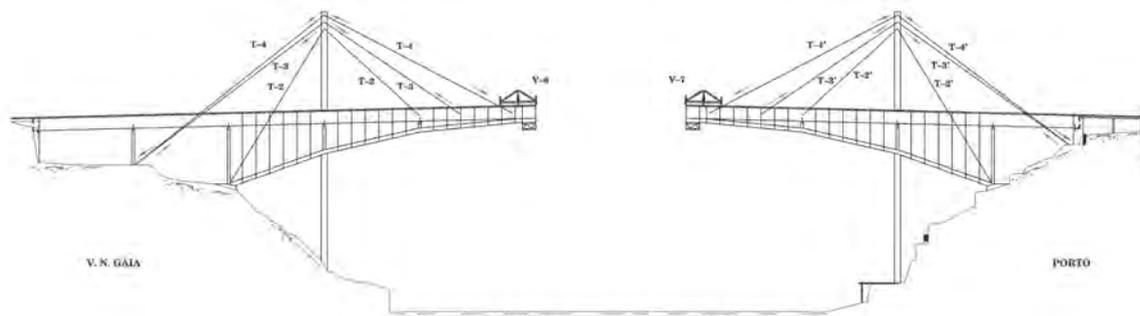


Fig. 5. Processo construtivo proposto em fase de concurso (1997).



A Fig. 8 mostra a Ponte numa fase já avançada da sua construção. Os 70 m centrais da Ponte (zona em que a viga do tabuleiro está “aglutinada” com o arco) foram executados também por aduelas (cuja secção transversal tem 6 m de altura) em avanços sucessivos definindo duas consolas com o vão máximo de 35 m.

Após a betonagem da aduela de fecho (Fig. 9), procedeu-se à desmontagem dos cabos de retenção, das diagonais, dos montantes e dos pilares provisórios, tudo numa sequência tão criteriosa quanto a utilizada na sua montagem.

Diversas técnicas e procedimentos do processo construtivo da Ponte Infante D. Henrique podem, pela sua singularidade, considerar-se como inovadoras. Inovações que esta obra acrescentou ao património atual das pontes em arco de grande vão. Aliás, a construção de uma grande Ponte com critérios de precisão geométrica nunca dantes exigidos constituiu, só por si, um grande desafio lançado aos Construtores. E construir um arco tão delgado e tão abatido ao longo de 280 m determinou um processo construtivo que só uma vez havia sido utilizado, na Ponte de Nakatanigawa, no Japão, onde o arco tem 100 m de vão e 19 m de flecha. Um processo construtivo em que o tabuleiro avançou à frente do arco.

Também se salienta a generalização do uso de sistemas



comandados e assistidos por computador no dia-a-dia da construção, situação que vai certamente caracterizar as “construções do século XXI”. Como exemplos, referem-se os pontos seguintes:

- O posicionamento da plataforma de suporte à cofragem do arco foi ajustado ao milímetro, antes da betonagem de cada uma das aduelas do arco, utilizando duas centrais automáticas que comandavam

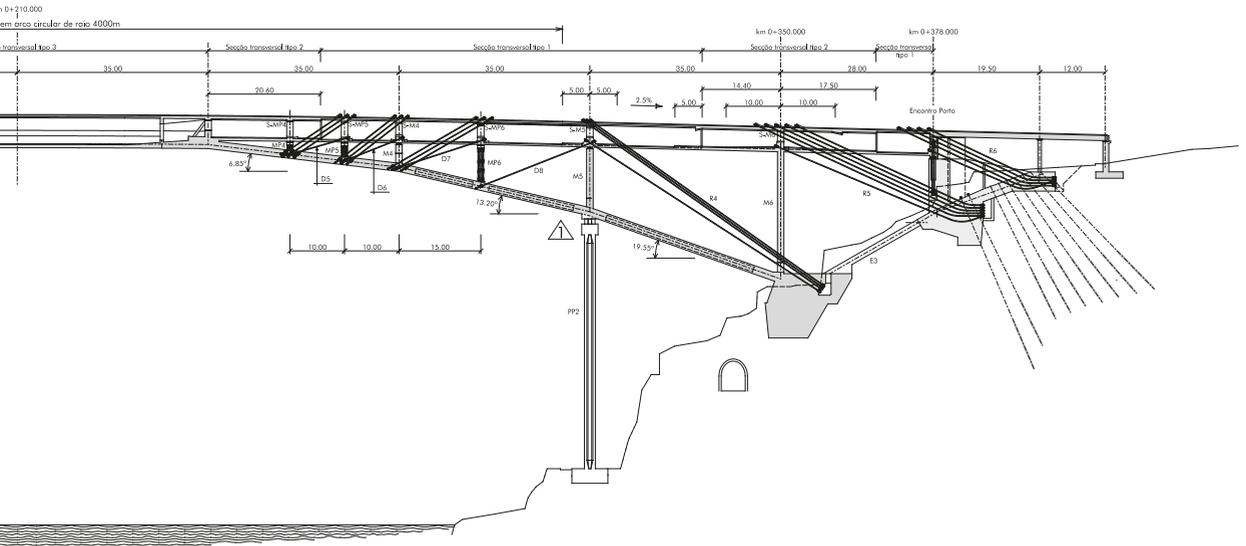


Fig. 8. Estado da construção em Janeiro de 2002.

os sistemas hidráulicos de suspensão das referidas plataformas;

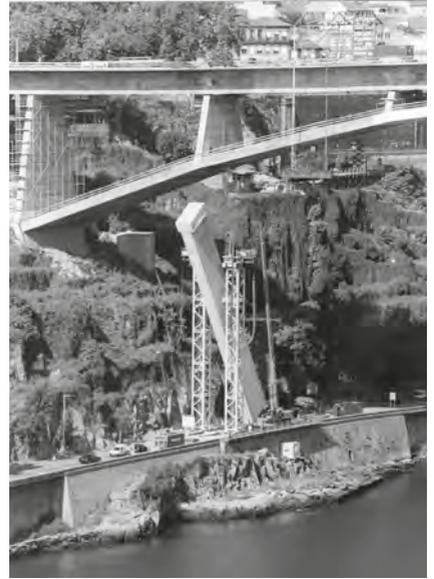
O acompanhamento do comportamento estrutural da Ponte em todas as fases construtivas foi efetuado com sistemas informáticos de recolha, armazenamento, gestão e interpretação das leituras fornecidas pelos dispositivos de monitorização “interna” dos pontos mais relevantes dos elementos estruturais da Ponte;

As operações especiais de introdução de levantamentos e assentamentos nos apoios sobre os pilares provisórios, bem como o desapoio da Ponte desses pilares provisórios, foram comandadas pelas referidas centrais computadorizadas e assistidas pelos sistemas informáticos de gestão da instrumentação da Ponte;

A desmontagem dos pilares provisórios foi conseguida com um sistema de rotação e translação de cada um dos pilares de 800 toneladas por inteiro (Fig. 10), com controlo e ajuste permanente da força introduzida pelos macacos hidráulicos que suspendiam o eixo de rotação localizado a meio do pilar.

O processo construtivo adotado obrigou, também, ao projeto e fabrico de um carro de avanços duplo muito engenhoso (Fig. 11), que se pode qualificar como obra singular de construção metálica industrial. Esse carro duplo permitiu a execução simultânea das aduelas do arco e do tabuleiro, operação que chegou a ser muito difícil quando a distância vertical entre ambos se tornou muito pequena. Mas sempre com tolerâncias geométricas extremamente apertadas.





< Fig. 9. Elementos provisórios à data da betonagem da aduela de fecho.  
Fig. 10. Desmontagem do pilar provisório do lado do Porto.  
Fig. 11. Carro de avanços.



# 4. Comparação entre processos construtivos

Se a solução estrutural da Ponte é arrojada, não surpreende que a sua construção tenha sido difícil e complexa. E isto qualquer que fosse o processo construtivo adotado. Entre as diversas alternativas estudadas, concluiu-se que o processo construtivo desenvolvido era o mais conveniente, por uma diversidade de razões de que se salientam, de uma forma não exaustiva, as seguintes:

- No processo construtivo adotado, os maciços rochosos nas nascenças do arco foram sendo gradualmente comprimidos com a evolução da construção; as vantagens que resultaram de tal facto são evidentes e importantíssimas; esta razão é tão forte que se poderia considerar mais do que suficiente para justificar a opção feita;
- No processo construtivo adotado, o arco foi sendo gradualmente comprimido com a evolução da construção, o que permitiu controlar e compensar durante a fase construtiva o seu encurtamento elástico e reduzir e compensar de forma significativa os efeitos das deformadas de retração e de fluência; portanto, desde o início da sua construção, o arco funcionou do modo para o qual foi concebido, isto é, à compressão; as cargas foram introduzidas de modo gradual, o que foi muito vantajoso; como exemplo, apresentam-se na Tabela 1 os esforços atuantes no arranque do arco da meia-ponte do lado de Gaia, nas fases construtivas mais significativas;
- No processo construtivo adotado, o valor mais elevado da compressão no arco ocorreu quando as diagonais foram retiradas, portanto quando a estrutura ficou na sua constituição definitiva, registando-se um

acréscimo pequeno do esforço no arco relativamente à força já instalada mesmo antes do seu fecho; pelo contrário, na estrutura construída por atirantamento (processo proposto em fase de concurso), o esforço axial de 27 865 toneladas seria quase totalmente instalado de uma só vez, com a libertação dos tirantes; uma tal transferência “brusca” do esforço para o arco não seria certamente uma boa solução, sendo muito mais seguro fazê-lo de modo gradual e muito lento, especialmente num arco tão esbelto como este; O processo de construção com um sistema de atirantamento a partir de torres juntaria à complexidade do controlo geométrico as incertezas resultantes das redistribuições hiperestáticas por efeitos térmicos entre tabuleiro e tirantes; em tal caso, existiria um maior risco de desvio de esforços e tensões no tabuleiro;

No processo construtivo adotado, a repartição de esforços entre tabuleiro, arco e diagonais é, na generalidade, muito menos sensível ao referido tipo de redistribuição, que se sublinha ser de difícil avaliação e controlo;

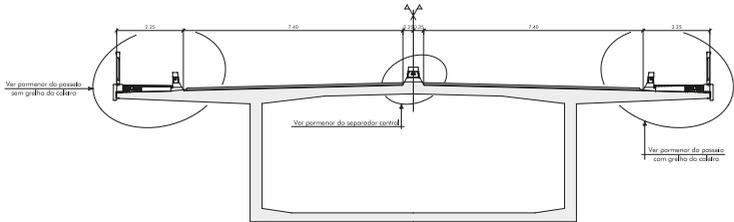
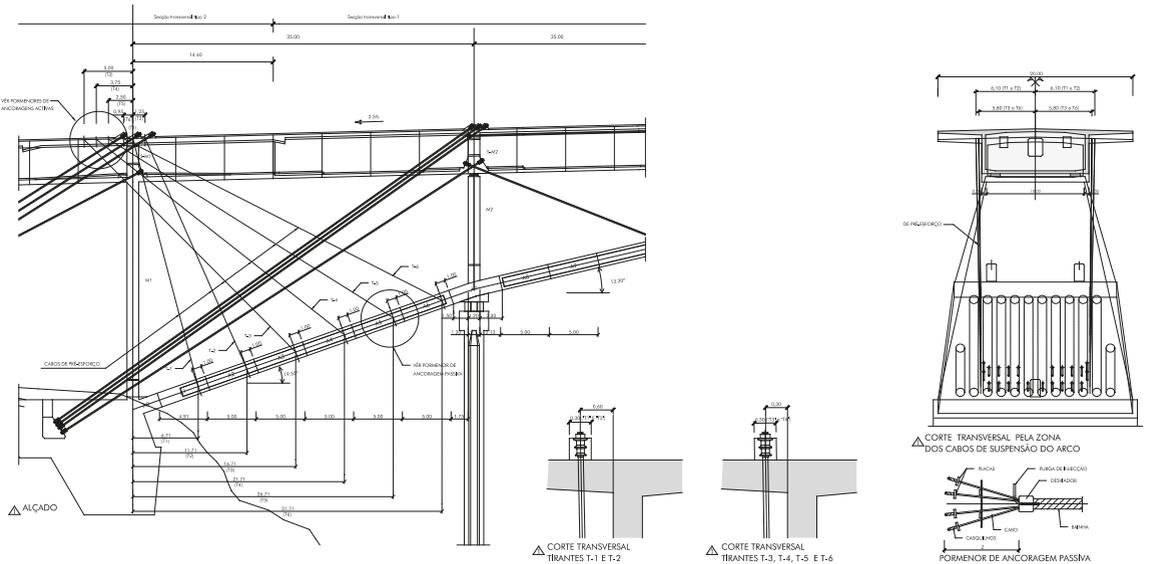
Com o processo de atirantamento a partir de torres, em fase construtiva o arco apenas constituiria um “peso morto”, a ser suportado pelos tirantes, não desempenhando qualquer função estrutural, o que não acontece no processo construtivo adotado; este último é então muito mais eficiente do ponto de vista de aproveitamento dos materiais e elementos estruturais;

A viga treliça, construída por avanços sucessivos, constitui um sistema estrutural muito mais rígido do que o proposto em concurso, sendo totalmente aplicáveis as técnicas de correção das cofragens próprias dos carros de avanços sucessivos em consola tradicionais.

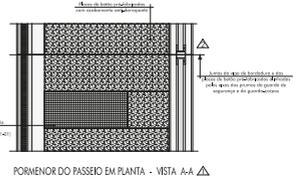
Tabela 1. Evolução dos esforços axiais no arranque do arco do lado de Gaia.

Fase da obra	Esforço axial (toneladas)
Ao atingir-se o montante M2	1 228
Ao atingir-se o montante M3	2 977
Ao realizar-se a união arco-tabuleiro	17 447
No fecho da Ponte	26 928
Após retirar as diagonais, cabos de retenção e barras de suspensão do arco	27 865

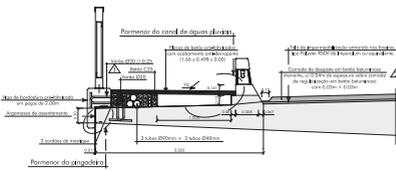




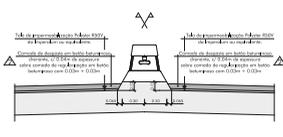
CORTE TRANSVERSAL DO TABULEIRO COM ACABAMENTOS ▲



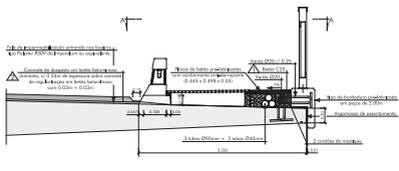
PORMENOR DO PASSADO EM PLANTA - VISTA A-A ▲



PORMENOR DO PASSADO SEM GRELHA DA CALEIRA ▲



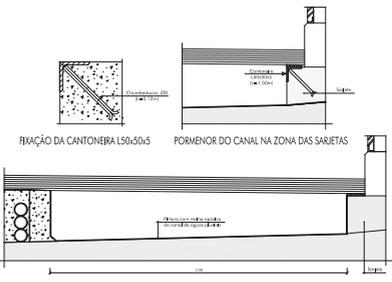
PORMENOR DO SEPARADOR CENTRAL ▲



PORMENOR DO PASSADO COM GRELHA DA CALEIRA ▲

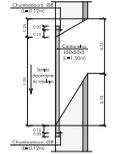


PORMENOR DA VIGA DE BORDADURA ▲

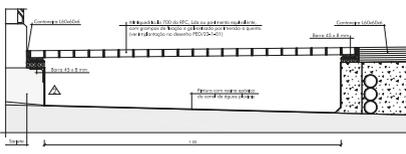


PORMENOR DO CANAL DE ÁGUAS PLUVIAIS SEM GRELHA ▲

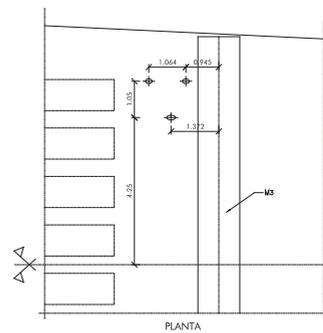
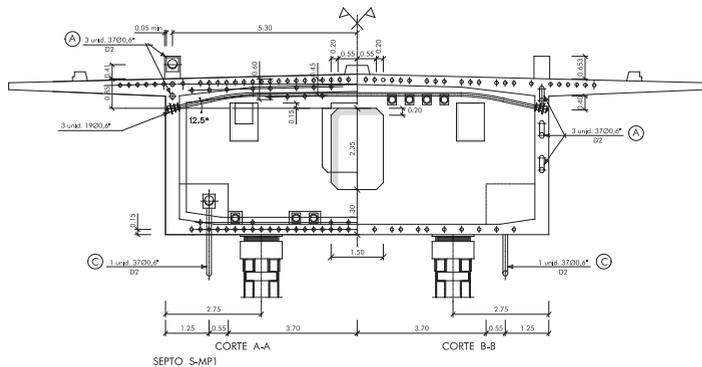
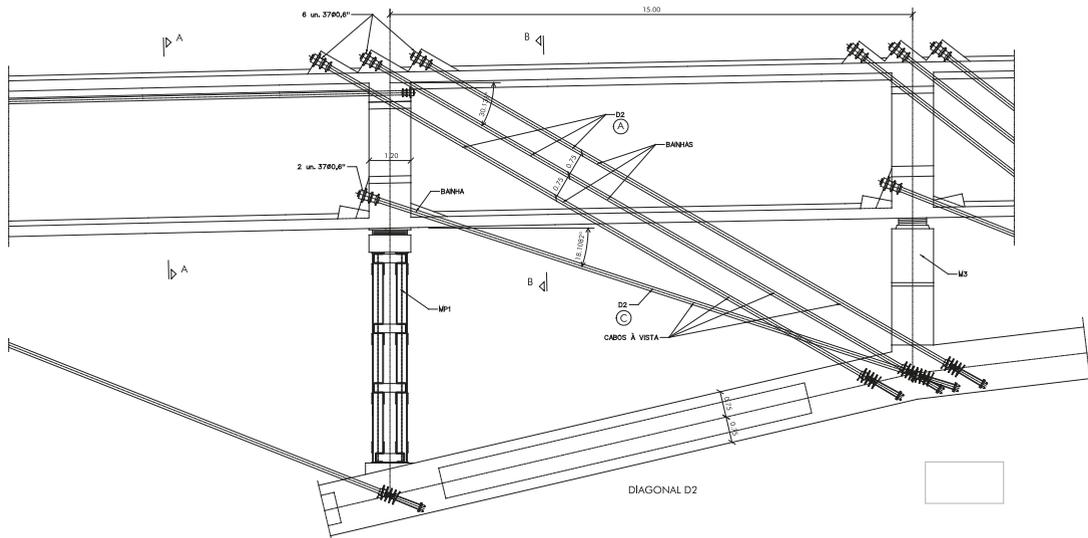
SISTEMA DE DRENAGEM DO TABULEIRO

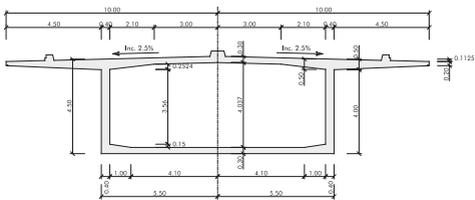


PLANTA DAS SARIETAS

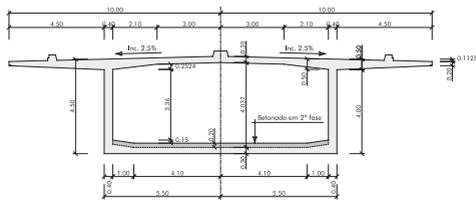


PORMENOR DO CANAL DE ÁGUAS PLUVIAIS COM GRELHA ▲

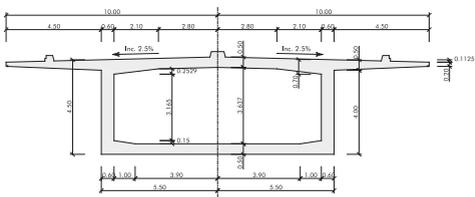




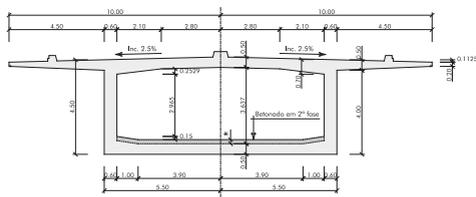
SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 1



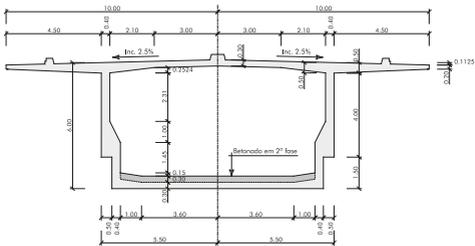
REFORÇO EM 2ª FASE DA SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 1



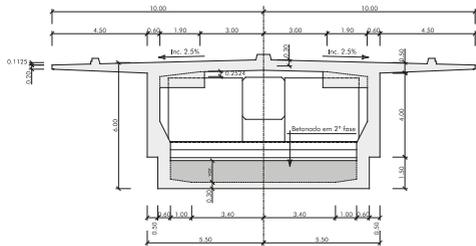
SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 2



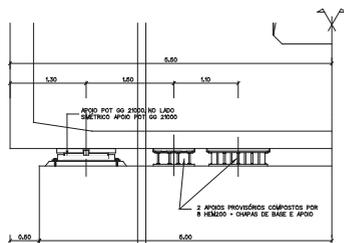
REFORÇO EM 2ª FASE DA SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 2



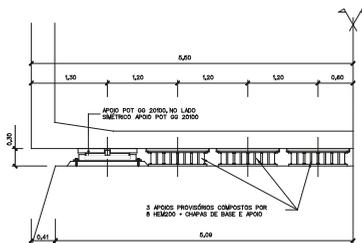
SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 3



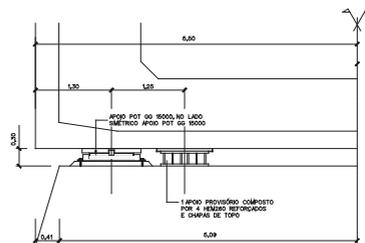
SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO 3  
(ZONA DE TRANSIÇÃO ARCO-TABULEIRO)



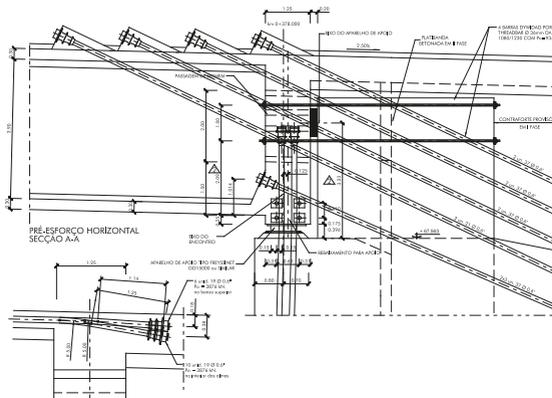
PORMENOR DOS APOIOS NOS PILAR P1



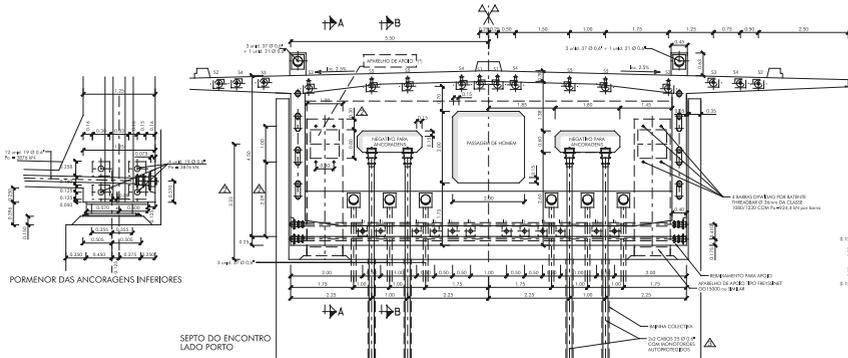
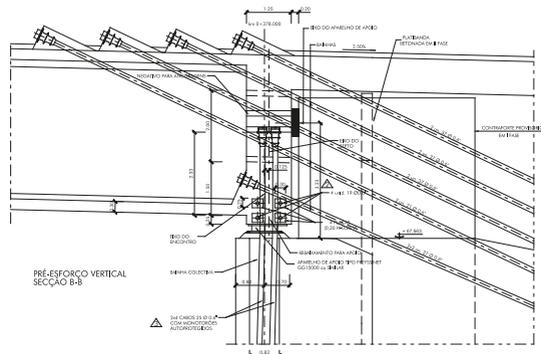
PORMENOR DOS APOIOS NOS MONTANTES M2 E M3



PORMENOR DOS APOIOS NOS MONTANTES M3 E M4

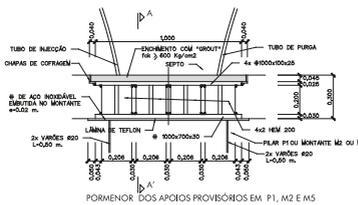


PORMENOR DAS ANCORAGENS SUPERIORES

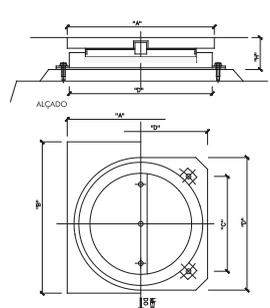


PORMENOR DAS ANCORAGENS INFERIORES

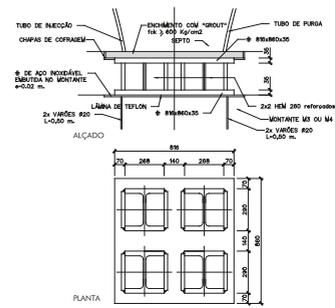
SEPTO DO ENCONTRO LADO PORTO



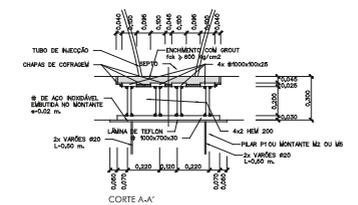
PORMENOR DOS APOIOS PROVISÓRIOS EM P1, M2 E M5



ALÇADO



PORMENOR DOS APOIOS PROVISÓRIOS EM M3 E M4



CORTE A-A

APOIO TIPO GG DESLIZANTE GUIADO ESCALA 5:1

TIPO APOIO	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
GG 21000	1120	1290	837	1120	174
GG 20100	1090	1240	837	1090	169
GG 10000	880	1030	833	880	165

# 5. Epílogo

Projetistas e construtores reconhecem que a construção da Ponte do Infante foi extremamente difícil, mas foi realizada sempre com total segurança e controlo do seu comportamento estrutural.

E assim, certamente que as Pontes Maria Pia e Luiz I receberam bem, entre elas, a Ponte Infante D. Henrique, como se pode constatar pela Fig. 12.

*La visión de este puente, que nos trae a la memoria a Maillart y sin duda a su admirado Freyssinet, que es para nuestro autor el Velázquez de los Ingenieros, es espectacular. En él apreciamos esa capacidad de convertir las masas en algo ideal, esa visión hegeliana que Fernández Ordoñez cita hablando del Ingeniero Roebling, autor hace más de un siglo del puente de Brooklyn en Estados Unidos. Hay momentos en los que es fácil entender lo más complejo, como cuando miramos esta obra que será un tesoro para nuestros vecinos y en la que las tensiones se petrificarán, explicando la sencillez y la complejidad de la materia dominada, mostrándonos ese eterno pulso del atleta contra los elementos naturales y la gravedad, ese afán de progreso de la ingeniería, esa actitud positiva, sencilla, ligera de equipaje.*

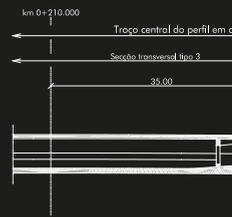
Salvador Pérez Arroyo,

ABC CULTURAL de 18 de Dezembro de 1999, sobre a vida e obra de José Antonio Fernández Ordoñez



Fig. 12. Vista aérea das Pontes Maria Pia, Infante D. Henrique e Luiz I.





apoios

