

PONTE PEDONAL SOBRE O RIO DOURO

Material estrutural, dimensionamento e pormenorização

António Adão da Fonseca¹, Francisco Millanes Mato², Renato Bastos³, Javier Pascual Santos⁴, Miguel Ortega Cornejo⁵, António Pimentel da Fonseca⁶

RESUMO

O projecto que se apresenta para a Ponte Pedonal a construir sobre o rio Douro e entre as Ribeiras das cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia consiste num arco de abatimento muito elevado, vencendo um vão único de 156 metros, a ser realizado em aço inoxidável. Referem-se neste artigo os aspectos mais relevantes relacionados com o dimensionamento e pormenorização dos elementos estruturais da Ponte, destacando-se os relacionados com a especificidade do material estrutural escolhido.

1. INTRODUÇÃO

A Ponte Pedonal, a construir entre as ribeiras de Porto e Gaia, no local onde existiu em tempos a Ponte Pênsil, é formada por um arco que vence um vão 156 m com uma razão de esbelteza de 1:13. Deste arco separam-se, junto às suas nascenças, duas rampas de forma a limitar a inclinação máxima do percurso pedonal e a permitir alcançar as plataformas existentes nos promontórios localizados em ambas as margens.

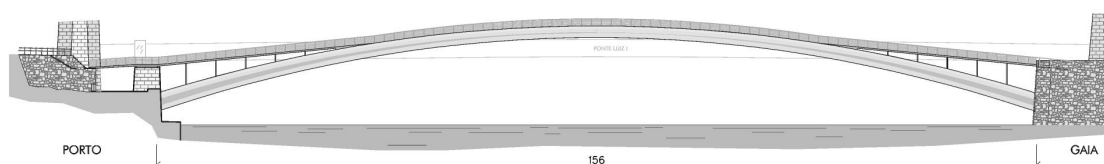


Fig. 1 – Alçado poente da Ponte Pedonal

¹ Engenheiro Civil, AFAssociados – Prof. Catedrático, FEUP

² Engenheiro Civil, IDEAM – Prof. Catedrático, ETSICCPM

³ Engenheiro Civil, AFAssociados

⁴ Engenheiro Civil, IDEAM

⁵ Engenheiro Civil, IDEAM

⁶ Engenheiro Civil, AFAssociados

A secção transversal do arco, de formas hidrodinâmicas, é formada por um caixão unicelular com 6,6 m de largura e altura variável entre 3 m no arranque e 2 m no meio vão. Na zona das rampas, a secção tubular é inteiramente composta pela chapa de aço inoxidável, passando a ser uma secção mista na zona central, onde o banzo superior é realizado pela laje em betão armado que serve de suporte ao pavimento em madeira.

A chapa de aço inoxidável que realiza a secção estrutural resistente tem espessura constante igual a 20 mm, sendo reforçada por estruturas internas de contraventamento em aço carbono S-355J2G3.

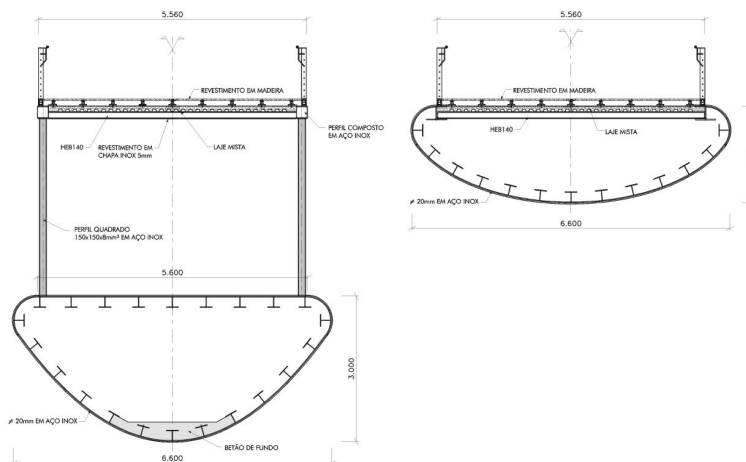


Fig. 2 – Cortes transversais

2. MATERIAL ESTRUTURAL

2.1. O aço inoxidável

O desenvolvimento, mais ou menos recente, das tecnologias de fabrico e de soldadura dos aços inoxidáveis colocou à disposição da Engenharia Civil um “*novo material*” de notáveis características mecânicas, de grande durabilidade, praticamente sem custos de manutenção, e com inegável qualidade estética. A aplicação estrutural destes aços é muito rara, mas deixará, com certeza, de o ser num futuro próximo.

Os aços inoxidáveis usualmente utilizados na construção civil são aços austeníticos, sendo os mais comuns os das classes A304 ou A316. Estes aços possuem importantes resistências à corrosão mas as suas menores qualidades mecânicas impedem a sua utilização em elementos com exigências de alto desempenho estrutural.

O aço inoxidável escolhido para a Ponte Pedonal sobre o rio Douro é um aço duplex (austenítico-ferrítico) que combina as qualidades de resistência à corrosão dos aços austeníticos e de resistência mecânica dos aços ferríticos. A classe ou qualidade do referido aço é a estabelecida na Norma Europeia EN 1.4462, sendo as normas internacionais equivalentes mais relevantes as seguintes:

- EN 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3)
- DIN 1.4462 (X2CrNiMoN 22 53)
- ASTM S31803
- AFNOR Z2CND 22-5 Az
- BSI Duplex 2205
- SS 2377
- UNS S31803

A composição química deste aço apresenta-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição química do aço inoxidável EN 1.4462

C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	P	Cu	S
< 0.03%	21.5 a 24.5%	5.5 a 6.0%	3 a 3.5%	0.05 a 0.2%	≤ 1.0%	≤ 2.5%	≤ 0.04%	0.05 a 0.6%	≤ 0.03%

Os conteúdos de ferrite estão de acordo com a norma ASTM-A-562, que estabelece os limites seguintes:

- chapas, tubos, barras e acessórios: % de ferrite entre 30 e 50;
- material de soldadura: % de ferrite entre 25 e 65.

Para valores mais baixos do conteúdo de ferrite, o aço torna-se mais frágil e baixa a sua resiliência. Para valores mais altos, reduz-se a resistência à corrosão do aço.

As características mecânicas cumprem as seguintes especificações (a 20°C, salvo indicação em contrário):

- Limite elástico característico a 0.2% $f_{yk} \geq 460 \text{ MPa}$
- Tensão última de rotura em tracção $f_{pu} \geq 640 \text{ MPa}$
- Deformação última de rotura $A_5 \geq 25 \%$
- Módulo de elasticidade $E_s = 200 \text{ GPa}$
- Peso específico $\gamma = 78 \text{ kN/m}^3$
- Coeficiente de dilatação térmica $\alpha_s \approx 1.3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ entre 20 e 100°C.

2.2. Corrosão do aço inoxidável

Os aços inoxidáveis não são materiais nobres como o ouro e a platina, que são, praticamente, inertes na maioria dos ambientes. Os aços inoxidáveis devem a sua resistência à corrosão apenas à fina e invisível camada que se forma durante a reacção entre o metal e o oxigénio existente no ambiente. Esta camada de óxido tem uma baixíssima taxa de corrosão, razão porque se denomina de “passivado”. Exemplos de outros materiais que formam camadas de passivação são o titânio e o alumínio. Na verdade, ocorre um consumo muito lento de material no estado passivo à medida que a camada de passivação é lentamente dissolvida, mas, também, reconstruída novamente pela oxidação das camadas internas do metal.

A camada passiva nos aços inoxidáveis é composta em grande parte de óxido de crómio e forma-se espontaneamente em ambientes que contenham oxidantes em quantidade suficiente. A superfície metálica exposta a danos mecânicos, como, por exemplo, arranhões, é, também, espontaneamente repassivada. O conteúdo em oxigénio do ar e da maioria das soluções aquosas é suficiente quer para a criação quer para a manutenção da camada passiva do aço inoxidável.

Há, contudo, ambientes que causam uma permanente quebra da camada passiva. Em circunstâncias onde a camada passiva não possa ser reconstruída, ocorre corrosão na superfície desprotegida do metal.

Diferentes causas significam diferentes tipos de ataque da corrosão que podem variar na natureza e na aparência, dando origem às várias formas de corrosão dos aços inoxidáveis: corrosão uniforme, corrosão galvânica ou bi-metálica, corrosão localizada (por picadura ou em folgas de interfaces), corrosão por fissuração devida a tensões, corrosão por fadiga e corrosão intergranular.

Uma característica comum dos aços inoxidáveis modernos é um alto conteúdo de crómio, molibdénio e, em muitos casos, azoto. Várias tentativas têm sido feitas para estabelecer uma medida da resistência à corrosão por picaduras calculando a soma “pesada”

dos elementos químicos mais importantes da liga metálica. Esta soma é conhecida por *PRE* (*pitting resistance equivalent*) e pode ser obtida pela expressão seguinte:

$$PRE = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 30 \times \%N$$

Contudo, deve ser salientado que as expressões do *PRE* são baseadas em ensaios de corrosão acelerada realizados em laboratório com materiais de base perfeitamente tratados a quente. O efeito dos vários processos de produção e de soldadura podem sobrepor-se completamente ao efeito de pequenas, ou até, em certos casos, grandes diferenças na composição dos aços.

O factor *PRE* de resistência à corrosão por picaduras causadas pela presença de iões cloro na atmosfera do aço escolhido para a Ponte Pedonal vale 35. O local de implantação da obra, o teor em cloretos da envolvente, a temperatura ambiente e a durabilidade requerida para a Ponte determinam o uso de uma classe de aço inoxidável com uma resistência à corrosão tão alta.

O acabamento superficial exterior será do tipo 2A, de polimento suave, com uma rugosidade compreendida entre 0.4 e 1.5 micra CLA, de forma a evitar a aderência de produtos contaminantes.

2.3. Corrosão bi-metálica ou galvânica

Por razões de economia, as treliças de contraventamento e os perfis de apoio da laje mista sob o pavimento de madeira são em aço carbono. Consequentemente, é preciso tomar medidas para evitar a corrosão bi-metálica ou galvânica que pode ocorrer quando dois metais distintos (com diferente electronegatividade) estão em contacto na presença de um líquido condutor, um electrólito, fazendo com que o seu desempenho frente à corrosão seja significativamente minorado quando comparado com as características de cada um dos dois metais em separado. Como regra geral, o metal menos nobre, o ânodo, é mais severamente atacado, enquanto que o metal mais nobre, o cátodo, “fica” mais protegido da corrosão. O ataque da corrosão é normalmente mais evidente na zona de contacto dos dois metais.

O grau de ataque galvânico, tal como descrito anteriormente, depende em grande parte da natureza e da cinética das reacções electro-químicas que ocorrem na superfície dos dois metais que formam o par galvânico. Mas, outros factores influenciam, também, a intensidade da corrosão bi-metálica, a saber:

- a diferença da nobreza dos dois metais;
- a razão entre as áreas das superfícies não protegidas dos dois metais;
- a condutividade do electrólito.

Desde que os aços inoxidáveis permaneçam “passivados”, são, na maior parte dos ambientes, mais nobres do que outros materiais de construção metálica e por isso formam o cátodo dos pares galvânicos. Daí resulta que o acoplamento galvânico aos aços inoxidáveis pode aumentar as taxas de corrosão dos metais menos nobres tais como o aço macio, o aço galvanizado, o cobre e o latão.

A corrosão galvânica entre diferentes classes de aços inoxidáveis não constitui, geralmente, um problema, desde que cada classe de aço inoxidável seja “passivado” no estado desacoplado e no ambiente específico em causa. Mas, se uma das classes for activa no estado isolado, o acoplamento com uma classe mais nobre pode aumentar a sua taxa de corrosão.

A corrosão galvânica pode ser prevenida através da utilização de peças especiais, tais como anilhas de isolamento e patilhas isoladoras, no entanto, estes isoladores podem originar corrosão nas folgas da interface (*crevice corrosion*) quando se encontram na presença de soluções contendo cloro.

Relações pequenas entre as superfícies do ânodo e do cátodo provocam maiores taxas de corrosão do ânodo e devem, portanto, ser evitadas. O revestimento ou a pintura de um material menos nobre galvanicamente acoplado a um aço inoxidável não revestido devem, por isso, ser evitados, dado que se podem obter taxas de corrosão muito altas em pequenas áreas do ânodo formadas quando ocorrem defeitos no seu revestimento. Assim sendo, revestir o material mais nobre de um par galvânico é, então, a medida eficaz de reduzir o risco de ataque galvânico.

A condutividade do electrólito afecta tanto a intensidade como a localização do ataque. Pequenas condutividades tendem a reduzir a taxa de corrosão, mas o ataque pode tornar-se muito concentrado na área adjacente ao local de contacto entre os dois metais.

2.4. Soldadura do aço inoxidável

A soldadura dos aços inoxidáveis e as propriedades das zonas soldadas no que diz respeito à resistência à corrosão e às propriedades mecânicas envolvem um conjunto complexo de factores metalúrgicos, geométricos e de acabamento das superfícies.

Estes factores podem ter uma importância variada dependendo das exigências de desempenho da construção soldada.

Simplificadamente, a soldabilidade de um aço pode ser atribuída apenas a factores metalúrgicos, enquanto que as propriedades mecânicas da zona soldada dependem quer de aspectos metalúrgicos quer de aspectos geométricos. Por último, a resistência à corrosão da soldadura dependerá de factores metalúrgicos, geométricos e de acabamento da superfície.

2.4.1. Factores metalúrgicos e soldabilidade

Os distintos aços inoxidáveis fornecidos pelas siderurgias possuem diferentes características de soldabilidade. Os 3 grandes grupos de aços inoxidáveis: ferríticos, austeníticos e austenítico-ferríticos têm apenas em comum o requisito de que a superfície a soldar deve ser meticulosamente limpa de forma a permitir uma soldadura aceitável com plena resistência à corrosão após todas as operações de soldadura.

Geralmente, os aços austenítico-ferríticos (aços duplex) possuem uma boa soldabilidade. Os aços duplex mais modernos, enriquecidos com azoto, possuem características de soldabilidade muito superiores às dos aços puramente ferríticos e podem geralmente ser soldados sem pré-aquecimento e sem tratamento térmico posterior à soldadura.

Dado que os aços duplex são totalmente ferríticos a altas temperaturas, há o risco inerente de se fixarem num estado altamente ferrítico em resultado do rápido ciclo térmico associado à soldadura. Ora esta ferrite é passível de ser severamente afectada pelo nitreto de crómio e o aço tornar-se bastante frágil, podendo a sua resistência à corrosão ser também afectada devido à precipitação intergranular de carbonetos e nitretos.

Este fenómeno foi frequentemente observado nos “antigos” aços duplex. Os aços duplex modernos possuem um maior conteúdo de azoto com a finalidade de estabilizar a austenite a altas temperaturas e facilitar a “reformação” de austenite, que se apodera, então, do azoto da ferrite, prevenindo assim a formação de nitretos prejudiciais. O maior conteúdo em azoto permite que os novos aços inoxidáveis duplex se posicionem mais facilmente na zona de equilíbrio entre austenite e ferrite, quando comparados com as antigas classes duplex.

As classes superduplex, muito enriquecidas, contendo normalmente 25% de crómio e 4% de molibdénio, possuem também níveis muito elevados de azoto, em geral ultrapassando 0.25%. Este alto teor em azoto é efectivo para estabilizar a austenite a altas temperaturas. Como resultado, o elemento soldado tem uma relação entre austenite e ferrite que não afecta a

estrutura de equilíbrio da chapa de base.

Os aços inoxidáveis duplex, mais ou menos em proporção com os seus conteúdos de cromo e molibdénio, são susceptíveis à formação de fases intermetálicas. Estas fases podem causar uma redução substancial na sua robustez e na sua resistência à corrosão. A formação destas fases nas zonas afectadas pelo calor ocorre se o material permanecer demasiado tempo (tempo total cumulativo) no intervalo 650-1050°C. É importante reforçar que o problema principal é a duração do intervalo de tempo em que o aço fica sujeito a esta banda de temperaturas prejudiciais.

Os aços inoxidáveis duplex não são susceptíveis à fissuração pelo calor, mas soldaduras repetidas numa mesma zona de metal podem causar fragilização da zona afectada pelo calor. Também um alto fornecimento de calor num material de pouca espessura pode ser prejudicial e resultar em perda de resistência à corrosão. Os procedimentos de soldadura devem ser certificados de forma a demonstrarem que estes efeitos foram evitados.

2.4.2. Acabamento da superfície

Nos aços inoxidáveis, junto às zonas soldadas, aparecem, usualmente, manchas causadas pela oxidação. A alta temperatura a que o aço inoxidável é sujeito localmente durante a soldadura, em combinação com a presença de oxigénio, ainda que em concentrações muito pequenas, é a razão desta oxidação. As várias cores das manchas reflectem diferentes espessuras e composições da camada de óxido.

Estas camadas de óxido não têm o mesmo potencial de protecção da fina camada de óxido da restante superfície metálica. Pior, a camada de metal por baixo da zona manchada pelo calor tem um teor em cromo inferior ao do material de base. A profundidade desta zona deficitária em cromo depende, entre outros factores, do fornecimento de calor durante a soldadura, do conteúdo de oxigénio do gás e do material em causa. Normalmente, a zona deficitária em cromo é muito fina e é facilmente removida juntamente com a própria zona manchada pelo calor.

2.4.3. Geometria da soldadura

Além das zonas manchadas pelo calor, produzidas durante a soldadura, os factores geométricos tais como defeitos de alinhamento, poros superficiais ou profundos, salpicos, escórias, fendas causadas por deficiências de fusão, rebaixamentos, fendas devidas ao calor, etc., têm um efeito significativo no comportamento do aço inoxidável quer no que respeita à corrosão quer no que respeita às propriedades mecânicas.

Dependendo da exacta geometria da soldadura, estes factores muitas vezes constituem causas óbvias de início de corrosão localizada. Devem, portanto, ser evitados ou removidos tão eficazmente quanto possível de forma a otimizar a resistência à corrosão da soldadura.

2.5. Implicações na utilização do aço inoxidável estrutural

As características descritas condicionaram o dimensionamento, a pormenorização e as especificações de execução desta obra.

Para evitar a corrosão bi-metálica, excluir-se-á o electrólito (água ou condensação) da superfície de contacto entre os dois metais, pelo que se pintará todo o interior do arco uma vez executada a estrutura metálica. Desenvolver-se-á, também, um programa de conservação que garanta a durabilidade e a reaplicação periódica da pintura, em todas as superfícies cuja protecção se possa deteriorar com o tempo.

A necessidade de inspecção das zonas mais sensíveis da obra – as zonas das soldaduras entre aço inoxidável e aço carbono – impedem a realização de “células fechadas” no interior da secção transversal. Por este motivo, optou-se por realizar as nervuras de contraventamento longitudinais em T e não em U, como é usual neste tipo de estruturas apenas em aço carbono.

Todas as soldaduras entre chapas que compõem a secção transversal, bem como a soldadura entre aduelas “pré-fabricadas”, são rematadas pelo exterior com uma nervura “decorativa” que marca os limites das peças e disfarça as inevitáveis perturbações provocadas pelo calor durante o processo de soldadura, ainda que estas se façam de forma controlada e limitando o fornecimento de calor, conforme o especificado para este tipo de material.

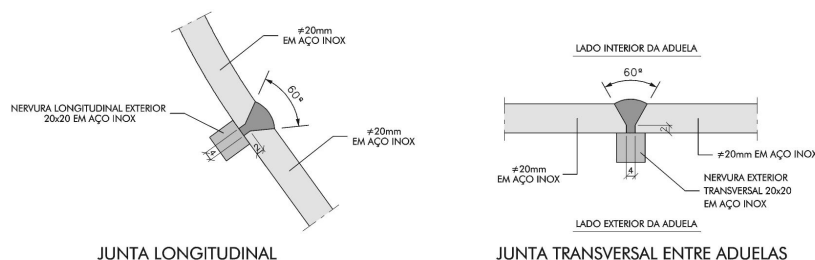


Fig. 3 – Nervuras exteriores decorativas na zona das soldaduras

Neste artigo serão ainda referidas outras opções de pormenorização motivadas pelos problemas descritos.

3. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O arco tem um funcionamento estrutural global “clássico” de um arco bi-encastado de grande abatimento, com a rigidez à flexão da secção em caixão do arco a “responder” às solicitações cujo antifunicular se afasta da forma parabólica do arco, como são, por exemplo, as sobrecargas assimétricas.

A perda de esforço axial num arco muito abatido, por assentamento dos seus apoios, com o conseqüente aparecimento de esforços de flexão importantes, costuma ser controlada impondo de início um esforço axial superior ao que apareceria pela resposta passiva da estrutura. Para esta operação, recorre-se usualmente à colocação em carga de macacos hidráulicos no fecho do arco. No caso presente, o processo construtivo adoptado permite obter o mesmo efeito apenas sobretensionando os tirantes inferiores provisórios do arco.

Mas salienta-se a importância dos esforços devidos ao constrangimento das deformações impostas pelas variações térmicas uniformes e diferenciais, pois a opção por encastamento nos arranques faz aumentar a hiperestaticidade e rigidez do sistema estrutural.

Aqueles esforços são condicionantes quer no dimensionamento interno da secção de arranque quer no dimensionamento externo das sapatas do arco. A grande alteração provocada no momento flector de encastamento devido à variação térmica uniforme, positiva ou negativa, obriga ao dimensionamento de uma fundação que seja suficientemente grande para “centrar” a resultante da reacção na sapata e assim obter um diagrama admissível de pressões na fundação.

Por outro lado, o aumento de rigidez do arco que resulta de encastar as nascenças do arco não só melhora a resposta dinâmica da estrutura às vibrações provocadas pelos peões como também faz diminuir consideravelmente o comprimento de encurvadura do arco. De facto, embora o arco seja muito abatido, os encastamentos nos apoios e as características da secção transversal tornam-no suficientemente rígido para evitar fenómenos de instabilidade

por encurvadura. A verificação da segurança em relação à encurvadura global efectua-se usando as expressões simplificadas do Eurocódigo 3. A análise modal de encurvadura mostra que os parâmetros de carga crítica se encontram dentro dos limites de validade da análise simplificada. Para a combinação correspondente à sobrecarga total, o parâmetro de carga crítica vale 8, e para a combinação correspondente à sobrecarga assimétrica vale 9. Realizou-se, também, uma análise do tipo P-delta, a partir da geometria deformada da estrutura.

Para analisar a sensibilidade da estrutura às vibrações induzidas pelos peões, calcularam-se os modos e respectivas frequências próprias de vibração da estrutura:

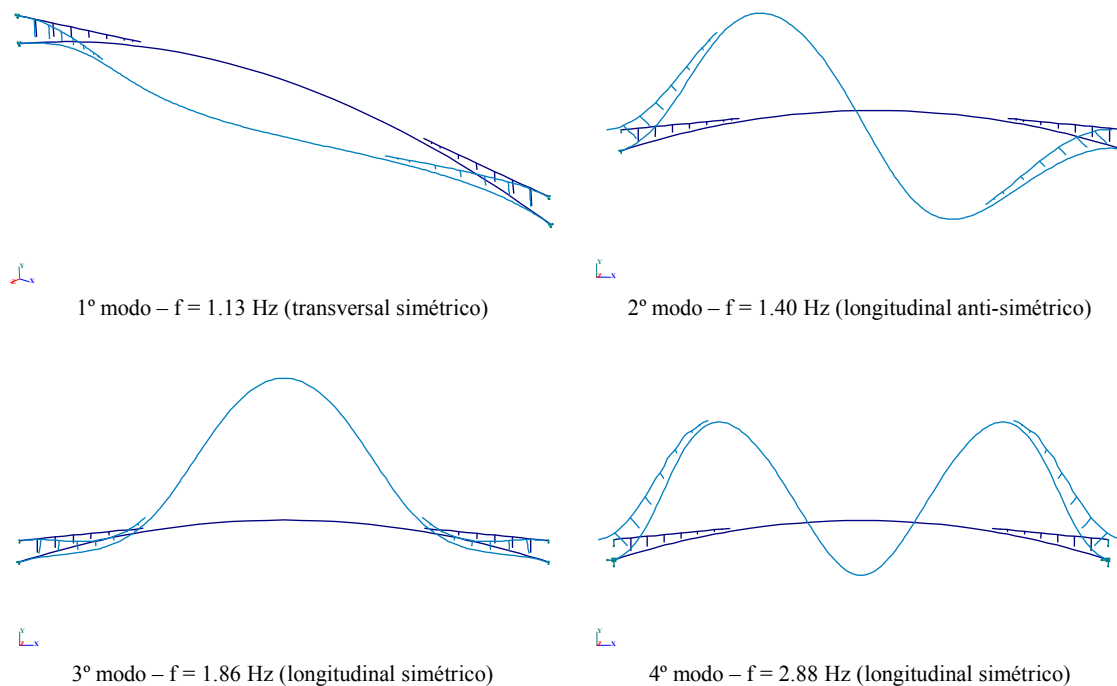


Fig. 4 – Modos de vibração da estrutura

A gama de frequências de vibração que pode ser excitada pelos peões situa-se entre 1.6 e 2.4 Hz para a acção vertical do peão a andar, elevando-se o limite superior para cerca de 3.5 Hz para o peão a correr. No caso da acção horizontal, as frequências são metade das indicadas para a acção vertical.

Havendo modos com frequências próprias dentro desta gama, torna-se necessário realizar análises dinâmicas no domínio do tempo, tendo-se constatado que o comportamento da estrutura é satisfatório por estar associado a deslocamentos muito pequenos.

No entanto, e tendo presente os recentes acontecimentos em pontes pedonais quando solicitadas por um grande número de pessoas, decidiu-se realizar análises mais detalhadas no domínio do tempo e no domínio da frequência para avaliar em pormenor a resposta dinâmica da estrutura, nomeadamente quando solicitada por conjuntos de peões a atravessar a ponte. As análises indicam que, caso se verifiquem níveis de vibrações fora do limite de conforto humano, a colocação de sistemas passivos de controlo realizados com amortecedores de massas sincronizadas (tuned mass dampers – TMD) permite reduzir substancialmente os deslocamentos, velocidades e acelerações, de modo a não provocarem desconforto nos utilizadores da ponte. Portanto, o dimensionamento é aceite.

A seguir apresentam-se os gráficos correspondentes às acelerações do nó central da

estrutura quando solicitado por um peão a saltar em fase com a estrutura.

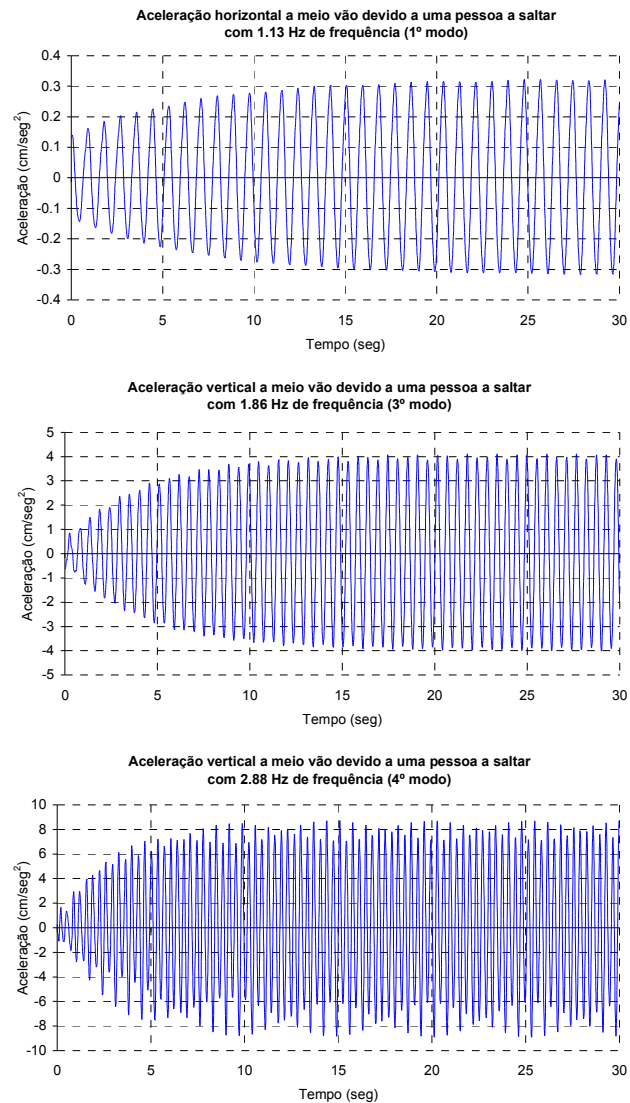


Fig. 5 – Resultados da análise dinâmica no domínio do tempo

4. PORMENORIZAÇÃO

As dimensões da secção transversal e a espessura da chapa adoptada determinam a colocação de nervuras de rigidez longitudinais e transversais, e a consideração de treliças de contraventamento transversais. As primeiras, em forma de T, estão dispostas de modo a que se possa considerar a secção como pertencendo à classe 3 descrita no Eurocódigo 3, e assim ser admissível um dimensionamento elástico com toda a secção eficaz. As nervuras transversais absorvem as forças de desvio que se desenvolvem na zona de intersecção entre aduelas. As treliças de contraventamento transversais, em forma de W, servem de apoio às vigas mistas transversais que suportam a laje de pavimento em betão armado e garantem o funcionamento solidário tubular da secção, evitando a sua distorção e empenamento. Funcionam, ainda, como apoios para as nervuras longitudinais, limitando o seu comprimento de encurvadura.

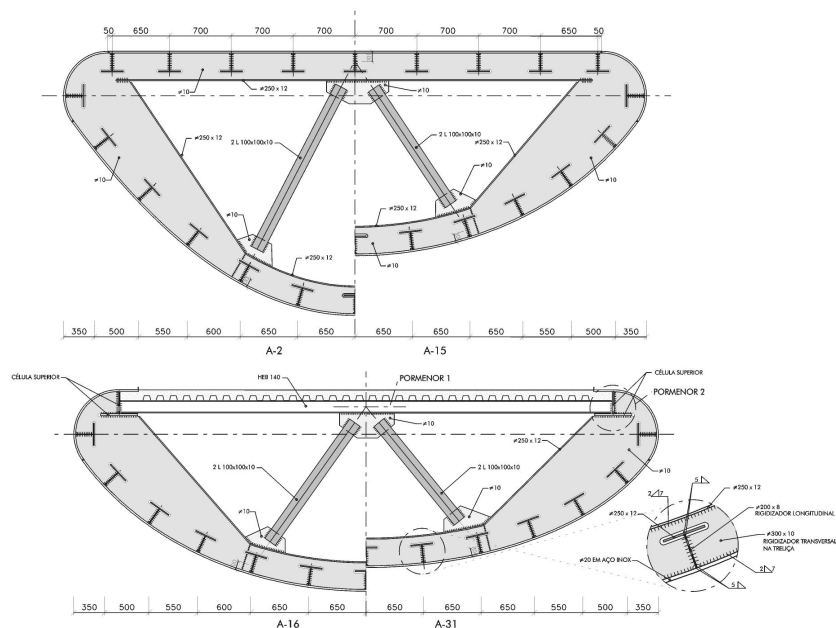


Fig. 6 – Treliças de contraventamento transversais

Nos arranques do arco, o banço de compressão do caixão é reforçado com betão junto à face inferior da secção, obtendo-se um funcionamento misto que faz face aos elevados momentos flectores negativos que se geram nos encastramentos.

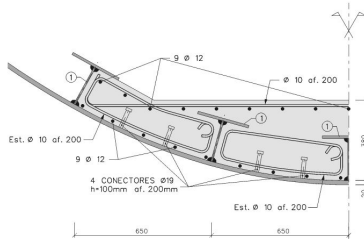


Fig. 7 – Pormenor do betão de fundo nos arranques do arco

As quantidades mais relevantes dos materiais a aplicar nesta obra são as seguintes:

- betão C35 nas sapatas do arco	1 150 m ³
- betão C35 na laje mista	88 m ³
- betão C40 no fundo das aduelas	21 m ³
- aço A500 NR em varão	128 904 kg
- aço laminado S355 J2G3	199 385 kg
- aço laminado S275 J2G3	19 018 kg
- aço inoxidável EN 1.4462	354 595 kg

5. REFERÊNCIAS

- [1] Alfonson, E., “Corrosion of stainless steels, general introduction”, Avesta Sheffield Corrosion Handbook, Sweden, pp 8-18, 1999.
- [2] Wallén, B., “Some factors affecting stainless steel corrosion in seawater”, Avesta Sheffield Corrosion Handbook, Sweden, pp 31, 1999.
- [3] Arnvig, P. E. e Stenvall, P., “Welding”, Avesta Sheffield Corrosion Handbook, Sweden, pp 85-88, 1999.

