



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS
Núcleo de Materiais Metálicos

Proc. 0204/17/17160

ABORDAGEM SOBRE A EVOLUÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE PONTES METÁLICAS

Estudo co-financiado pelo Projecto Duratinet "Durable
Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network"
Proj. n.º 049/2009 aprovado no Programa Transnacional
Espaço Atlântico, FEDER

Lisboa • Novembro de 2010

I&D MATERIAIS

RELATÓRIO 366/2010 – NMM

ABORDAGEM SOBRE A EVOLUÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE PONTES METÁLICAS

EVOLUTION APPROACH ON THE CONSTRUCTION OF METALLIC BRIDGES

ABORDAGE SUR L'EVOLUTION DANS LA CONSTRUCTION DES PONTS MÉTALLIQUES

ABORDAGEM SOBRE A EVOLUÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE PONTES METÁLICAS

ÍNDICE

	Página
1 Introdução	1
2 Enquadramento histórico	2
3 Materiais	4
3.1 Estruturais	4
3.2 Ligações entre componentes.....	5
3.3 Sistemas de protecção contra a corrosão.....	6
4 Soluções estruturais.....	8
4.1 Pontes em arco	8
4.2 Pontes suspensas	10
4.3 Pontes em viga.....	13
4.4 Pontes em consola.....	15
4.5 Pontes mistas.....	16
5 Pontes em Portugal.....	17
6 Referências bibliográficas	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1 Ponte de Coalbrookdale ^[1]	2
Figura 2 Viaduto de Xabregas.....	3
Figura 3 Evolução dos processos siderúrgicos ^(adaptado de [5])	4
Figura 4 Evolução dos tipos de aço ^(adaptado de [5])	5
Figura 5 Evolução das ligações nas estruturas metálicas ^(adaptado de [5])	6
Figura 6 Protecção contra a corrosão por esquema de pintura	7
Figura 7 Ponte em aço patinável ^[5]	7
Figura 8 Viaduto de Garabit ^[2]	8
Figura 9 Ponte Eads ^[2]	8
Figura 10 Ponte Hohenzollern ^[1]	9
Figura 11 Ponte do Observatório ^[1]	9
Figura 12 Ponte Union ^[1]	10
Figura 13 Ponte Menai Straits ^[1]	10
Figura 14 Ponte Wheeling ^[1]	10
Figura 15 Ponte Clifton ^[1]	10
Figura 16 Ponte Cincinnati-Covington ^[1]	11
Figura 17 Ponte George Washington ^[1]	11
Figura 18 Ponte de Brooklyn ^[1]	12
Figura 19 Ponte Golden Gate ^[1]	12
Figura 20 Ponte Theodor Heuss ^[1]	12
Figura 21 Ponte Britannia ^[1]	13
Figura 22 Ponte Tczew ^[1]	14
Figura 23 Ponte Saint-Jean ^[1]	14
Figura 24 Viaduto de Grandfey ^[1]	14
Figura 25 Ponte sobre o rio Reno ^[1]	15
Figura 26 Ponte Firth of Forth ^[1]	16
Figura 27 Solução estrutural - ponte mista.....	16
Figura 28 Ponte da Praia do Ribatejo	17
Figura 29 Ponte da Régua	17
Figura 30 Ponte da Portela	17
Figura 31 Ponte D. Maria Pia	18
Figura 32 Ponte Luís I.....	19
Figura 33 Ponte D. Luís	19
Figura 34 Ponte Eiffel	20
Figura 35 Ponte 25 de Abril	20

1 INTRODUÇÃO

Muitas pontes metálicas são um testemunho vivo de acontecimentos importantes, que estão directamente relacionados com o desenvolvimento tecnológico e industrial, assim como com a evolução da nossa história. Particularmente em Portugal, temos um grande património deste tipo de pontes.

A construção de pontes metálicas teve início no final do séc. XVII e, desde então, tem vindo a evoluir com soluções estruturais optimizadas, acompanhando o desenvolvimento da indústria metalúrgica.

Este trabalho pretende fornecer um panorama geral no que concerne à evolução histórica das pontes metálicas, no mundo e em Portugal, particularmente ao nível de materiais e soluções estruturais.

Este relatório surge do trabalho desenvolvido no âmbito do projecto nº 049/2009 DURATINET - *Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network* (<http://www.duratinet.org/>) - aprovado no Programa Transnacional Espaço Atlântico, co-financiado pelo FEDER, e foi incluído na Dissertação de Mestrado - Pontes Metálicas em Ambiente Marítimo: Metodologias de Avaliação, Reparação e Protecção ^[1].

2 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A máquina a vapor deu início à revolução industrial no final do séc. XVII, mas os caminhos-de-ferro apenas surgem no séc. XIX, em Inglaterra. Na segunda metade deste século, este meio de transporte generaliza-se por toda a Europa, tornando-se num dos principais factores de desenvolvimento e, conseqüentemente, de necessidade de construir as respectivas vias.

No entanto, a primeira ponte metálica a ser construída foi rodoviária, a Ponte de Coalbrookdale (Figura 1), em 1779. As pontes ferroviárias apenas surgem em 1825, com a construção do viaduto de Gaunless, projectado por Stephenson para a Linha de Stockton-Darlington.



Figura 1 Ponte de Coalbrookdale ^[1]

A história das pontes metálicas em Portugal está ligada à construção de estradas e à sua evolução desde a criação do Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria e do Conselho Superior de Obras Públicas, em 1852. A ponte rodoviária de Bertandos, em Viana do Castelo, é indicada pela antiga Junta Autónoma de Estradas (JAE) ^[3] como a primeira ponte metálica rodoviária construída em Portugal, no ano de 1874. No entanto, a primeira estrutura metálica portuguesa que se tem conhecimento é o viaduto de Xabregas (Figura 2), destinado ao tráfego ferroviário e inaugurado em 1854.

Em Portugal, tal como no resto da Europa, a construção de pontes metálicas também está ligada à expansão dos caminhos-de-ferro. Actualmente, cerca de 40% das pontes ferroviárias são metálicas, correspondendo a um comprimento total aproximado de 23,4 km, enquanto as não metálicas correspondem apenas a 15 km. A maioria destas pontes metálicas tem mais de um século, correspondendo a um comprimento aproximado de 9,2 km ^[4].



Figura 2 Viaduto de Xabregas

O património de pontes metálicas em Portugal é assinalável e muitas destas obras de arte deveriam ser consideradas como “monumentos históricos”. A neutralidade portuguesa na 2ª Guerra Mundial aliada às dificuldades financeiras de Portugal deram origem a uma política de reparação e/ou reforço das pontes, que permitiu a conservação destes equipamentos.

Na sequência desta política, em 1929 foi criada a Secção de Pontes da JAE ^[3], com o principal objectivo de estudar e executar trabalhos de reparação, reforço e substituição de pontes. Por volta de 1999, a JAE foi extinta e originou três institutos rodoviários, entre os quais o Instituto das Estradas de Portugal (IEP). Poucos anos depois, este instituto deu lugar às Estradas de Portugal (EP), actual responsável pela conservação das obras de arte pertencentes à Rede Rodoviária Nacional (RRN).

Quanto à conservação das pontes ferroviárias, a entidade responsável era a Companhia Real dos Caminhos de Ferro, constituída em 1860 e transformada nos Caminhos de Ferro Portugueses (CP) em 1951. Por volta de 1997, devido a imposições comunitárias, foi criada a Rede Ferroviária Nacional (REFER), actual responsável pela conservação das pontes ferroviárias, especificamente através da Secção de Pontes do Departamento de Estruturas e Projectos Especiais.

3 MATERIAIS

3.1 Estruturais

No início do séc. XVIII, Abraham Darby I desenvolve um método de produção de ferro de alta qualidade, o ferro fundido. Passadas três gerações, no final do mesmo século, Abraham Darby III constrói a primeira ponte metálica em Coalbrookdale (Figura 1), em 1777-79. Esta ponte foi projectada por T.M. Pritchard e ainda está em serviço, após ter sido objecto de reabilitação.

Por volta de 1784, surge o ferro pudelado, também designado por *wrought iron* (ferro forjado) na literatura inglesa, após o desenvolvimento do processo de pudelagem do ferro por Henry Cort. Este tipo de ferro começa a ser utilizado em pontes por volta de 1800 [5].

Desde 1777, até por volta de 1840, o ferro fundido e pudelado foram os materiais mais utilizados na construção de pontes metálicas, pois apresentavam uma boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas que, de algum modo, se complementavam nas suas aplicações, i.e., o ferro fundido com uma boa resistência à compressão e o ferro pudelado à tracção.

O aço começou a ser produzido no final do séc. XVIII e a sua utilização na construção de pontes começou no início do séc. XIX. Nessa altura, o processo de produção do aço não permitia a sua utilização em grande escala. Apenas com a invenção e desenvolvimento do processo siderúrgico por Bessemer por volta de 1855 e, mais tarde, dos processos de Thomas-Gilchrist e Siemens-Martin, é que foi possível produzir aços mais limpos, em quantidade e com melhores características [5]. Estes progressos foram ao encontro da grande necessidade de então, devido à expansão dos caminhos-de-ferro por toda a Europa.

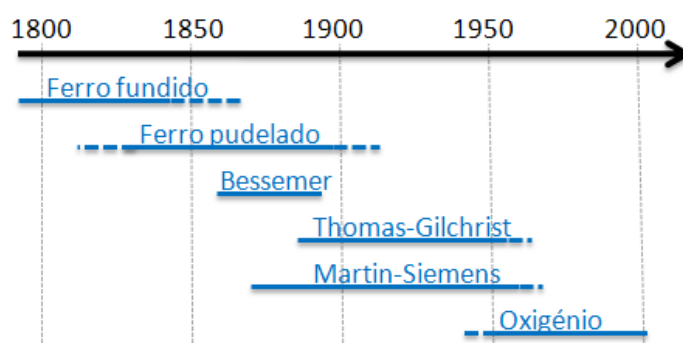


Figura 3 Evolução dos processos siderúrgicos (adaptado de [5])

Por volta de 1870, surge o aço laminado e, em 1874, é concluída a primeira grande ponte de aço no mundo, a ponte Eads, em Saint Louis, Missouri, com três vãos de 159m cada. De referir ainda outras duas referências mundiais das pontes em aço: a ponte suspensa de Brooklyn, em Nova Iorque, construída em 1883; e a ponte em consola (tipo *cantilever*) Firth of Forth, na Escócia, em 1890.

Ainda em relação à construção de pontes em aço, é necessário tomar em consideração que, durante algumas épocas, nomeadamente durante a grande recessão (1929-1939), a 1ª (1914-18) e a 2ª Guerra Mundial (1939-45), o aço era produzido num ritmo muito elevado. Este facto traduz-se na possibilidade de algumas das pontes construídas nestas épocas poderem apresentar alguns problemas de durabilidade devido à fraca qualidade do aço, principalmente devido ao aumento das cargas actuantes [5].

Ao longo do séc. XX, assistiu-se a outros progressos na siderurgia do aço, com o desenvolvimento de novos tipos de aço com maior resistência e ductilidade (Figura 4). A partir de 1960, os desenvolvimentos nos aços fracamente ligados conduziram aos aços designados de alto desempenho (*High Performance Steel, HPS*). Com uma excelente tenacidade e ductilidade, boa soldabilidade e, simultaneamente, elevada resistência à corrosão, este tipo de aço permitiu a construção de pontes inovadoras, reduzindo significativamente o seu peso e custo.

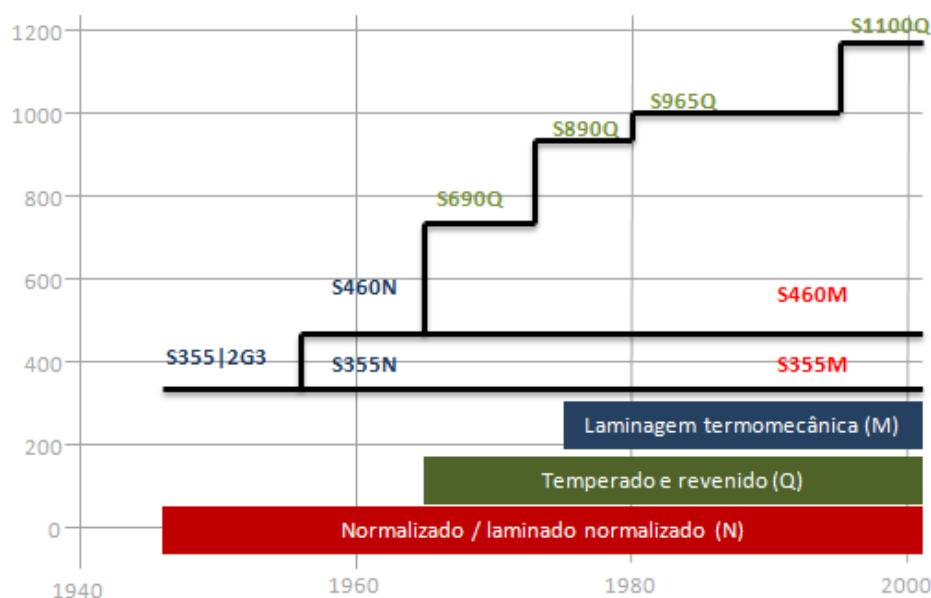


Figura 4 Evolução dos tipos de aço (adaptado de [5])

A partir de 1935, a construção de pontes metálicas começa a ser abandonada em detrimento do betão armado e da técnica do betão pré-esforçado, que surgem por volta de 1880 e 1930 respectivamente. A primeira grande ponte em betão armado foi a ponte Camille de Hogues, em Châtellerault, construída em 1899-1900, por François Hennebique [3]. A partir desta altura, a construção de pontes metálicas em Portugal, resume-se praticamente a duas grandes pontes sobre o rio Tejo, a ponte Marechal Carmona, em 1951, e a Ponte 25 de Abril, em 1966.

3.2 Ligações entre componentes

Desde o início da construção metálica até cerca de 1930 não se verificaram evoluções no tipo de ligações utilizadas, que consistiam essencialmente em ligações rebitadas ou com parafusos

correntes. Por volta de 1930, surge a soldadura na construção metálica e, em 1950, os parafusos de alta resistência. Estes dois tipos de ligação permitiram dar resposta a solicitações de carga muito superiores às ligações anteriores. No entanto, as estruturas soldadas vieram aumentar o risco de situações de falha devido à fissuração por fadiga [5].

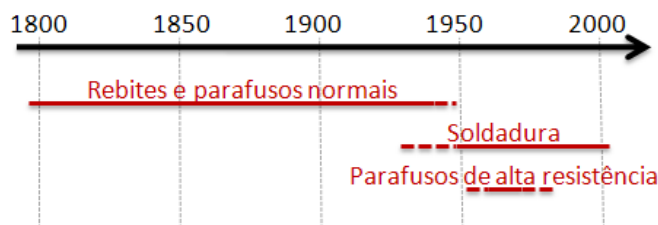


Figura 5 Evolução das ligações nas estruturas metálicas (adaptado de [5])

3.3 Sistemas de protecção contra a corrosão

Relativamente aos materiais utilizados na protecção contra a corrosão por pintura, os primeiros a serem utilizados foram as tintas à base de chumbo. Não se sabe exactamente quando é que este sistema de protecção começou a ser adoptado como sistema preferencial contra a corrosão, mas supõe-se que seja por volta de 1874. As pontes Eads, Brooklyn e Firth of Forth foram protegidas com este tipo de pintura e já estão em serviço há mais de dois séculos [5].

Este tipo de tintas tem um desempenho excelente, pois geralmente permite uma durabilidade expectável superior a 100 anos, sob diferentes condições de exposição e classes de corrosividade ambiental, desde que as estruturas e os respectivos sistemas de protecção sejam submetidas a manutenções periódicas. No entanto, a partir de 1970, por razões ecológicas e de saúde pública, este tipo de tintas foi proibido e substituído por novos sistemas.

Para além dos esquemas de pintura, existem também os revestimentos metálicos, normalmente de zinco ou ligas Zn-Al, e os sistemas “duplex”, que consistem na protecção simultânea por revestimento metálico e esquema de pintura (Figura 6). A aplicação de revestimentos metálicos apresenta-se como uma boa solução para estruturas aéreas, pois apresenta uma boa durabilidade na maioria dos ambientes. No entanto, a exposição à atmosfera induz alterações cromáticas do zinco que provocam um visual pouco atractivo, pelo que, para satisfazer também requisitos estéticos, é aconselhável a utilização do sistema “duplex”, que permite ainda maior durabilidade [5].

Actualmente, existem alguns tipos de aço, nomeadamente os aços patináveis (*weathering steel*) (Figura 7), que não necessitam de protecção contra a corrosão. A exposição deste tipo de aço à atmosfera forma produtos de corrosão à superfície do metal-base que o protege contra a corrosividade do ambiente. No entanto, o aço patinável é apenas indicado para classes de corrosividade baixas, pois não é eficaz na protecção contra ambientes agressivos, tais como ambientes marítimos.



Figura 6 Protecção contra a corrosão por esquema de pintura



Figura 7 Ponte em aço patinável ^[5]

4 SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

Antigamente um dos principais problemas na construção de pontes era a concepção e construção de fundações no leito dos rios, tornando conveniente a construção de pontes com grandes vãos. A solução encontrada foi a construção metálica, que permitiu pontes mais leves e, conseqüentemente, com maiores vãos. A construção de pontes metálicas data de finais do séc. XVII e vem evoluindo com soluções estruturais optimizadas, analogamente ao desenvolvimento da indústria metalúrgica.

4.1 Pontes em arco

Conforme previamente referido, a primeira ponte metálica foi a ponte de Coalbrookdale (Figura 1), projectada por T.M. Pritchard e construída por Abraham Darby III. Esta ponte, com um vão de 30m, ainda está em funcionamento, após reabilitação, e o seu sucesso é atribuído à adequação do sistema estrutural — ponte em arco — ao material utilizado, ferro fundido.

Esta adequação do material à tipologia construtiva da ponte em arco foi desenvolvida pelo engenheiro Reichenbach, que criou um método onde os tubos em ferro são utilizados como elementos em compressão do arco. Um dos melhores exemplos deste sistema é a ponte Carrousel, construída em 1839 por Polonceau, em Paris ^[6].

Um dos principais impulsionadores das pontes em arco foi Gustave Eiffel, que dirigiu e fundou a Société Eiffel em 1866, um gabinete dedicado ao estudo e construção de estruturas metálicas. Uma dessas estruturas metálicas foi o viaduto de Garabit (Figura 8), construído em França no ano de 1884 e que foi uma das principais obras de Eiffel.

Uma outra ponte em arco importante, devido a ser a primeira ponte em aço e ter batido o recorde de maior vão do mundo da época com 159m, foi a ponte Eads (Figura 9), em Saint Louis, Missouri. Esta ponte rodoviária e ferroviária, construída em 1874, ainda é utilizada e foi baptizada em homenagem ao seu projectista, J.B. Eads ^[6].



Figura 8 Viaduto de Garabit ^[2]



Figura 9 Ponte Eads ^[2]

Além das pontes em arco mencionadas, com tabuleiro superior, temos também um outro tipo de sistema estrutural, as pontes em arco atirantadas com tabuleiro inferior. As primeiras pontes deste tipo foram construídas em Hamburgo, sobre rio Elba, por volta de 1899. Podemos encontrar um bom exemplo deste tipo de solução estrutural na ponte Hohenzollern (Figura 10), em Colónia, construída em 1910.



Figura 10 Ponte Hohenzollern ^[1]

Este tipo de sistema estrutural comporta-se da mesma forma que uma estrutura em viga treliça, que será apresentada mais à frente, onde o arco desempenha as funções dos membros superiores da treliça e o tabuleiro as dos membros inferiores. A utilização deste tipo de pontes em arco permite suportar cargas maiores e vencer maiores vãos do que as pontes em viga treliça ^[6].

Posteriormente, tem sido utilizado outro tipo de ponte em arco, similar à solução anterior, a solução tipo *bowstring*. Esta solução estrutural consiste num tabuleiro inferior suspenso por tirantes que transferem as cargas para o arco metálico. Um bom exemplo da versatilidade deste tipo de pontes é a ponte do Observatório, em Liège (Figura 11), projectada por Santiago Calatrava e construída em 2002.



Figura 11 Ponte do Observatório ^[1]

4.2 Pontes suspensas

Por volta de 1819, Samuel Brown inventa um tipo de corrente em ferro e constrói a primeira ponte pênsil em ferro pudelado na Europa, a ponte Union (Figura 12), no Reino Unido. Pouco tempo mais tarde, em 1826, Thomas Telford construiu outra ponte pênsil que bate o recorde de ponte com maior alcance da época, a ponte Menai Straits (Figura 13), também no Reino Unido ^[6].



Figura 12 Ponte Union ^[1]



Figura 13 Ponte Menai Straits ^[1]

Dentro desta tipologia construtiva, temos que referir a Grande Ponte Suspensa, construída por Joseph Chaley na Suíça, em 1834, e demolida em 1923. Esta ponte pênsil foi construída em ferro pudelado, tinha um vão único de 273m e foi a maior ponte do mundo até à construção da ponte Wheeling (Figura 14), nos Estados Unidos da América. A ponte rodoviária Wheeling, projectada por Charles Ellet Jr., foi construída em 1849 e destruída por uma tempestade em 1855. No entanto, foi reconstruída e ainda está em funcionamento actualmente.

Ainda outra ponte pênsil digna de referência é a ponte Clifton (Figura 15), no Reino Unido, da autoria de Brunel. Esta ponte rodoviária foi construída em ferro pudelado no ano de 1864 e actualmente ainda exerce a sua função.

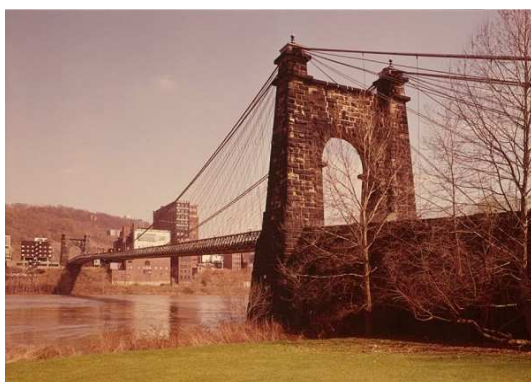


Figura 14 Ponte Wheeling ^[1]



Figura 15 Ponte Clifton ^[1]

Enquanto na Europa construíam-se pontes suspensas por correntes de ferro (ponte pênsil), nos Estados Unidos da América começavam-se a desenvolver os cabos metálicos, que eram consideravelmente mais resistentes. No entanto, a primeira ponte suspensa por cabos metálicos

foi construída na Europa, a ponte de Saint-Antoine. Esta ponte pedestre foi construída em 1823, na cidade de Genebra, e é da autoria de G.H. Dufour e Marc Séguin ^[6].

O principal problema deste tipo de pontes residia no facto de ser difícil garantir a mesma força de tracção em todos os fios do cabo metálico. Tal situação foi resolvida por John A. Roebling, que desenvolveu um método de enrolamento mecânico dos cabos in situ, que havia sido previamente sugerido pelo engenheiro francês L.J. Vicat.

Em 1866, John A. Roebling construiu a maior ponte suspensa do mundo da época, a ponte Cincinnati-Covington (Figura 16), sobre o rio Ohio. Esta ponte era originalmente em ferro forjado, com um vão máximo de 322 m, e o tabuleiro era constituído por uma treliça ^[6]. Por volta de três décadas após a sua construção, esta ponte foi reforçada com cabos de aço e o tabuleiro substituído por outro, igualmente em aço.



Figura 16 Ponte Cincinnati-Covington ^[1]

A primeira ponte a exceder um vão de 1 km, nomeadamente 1.067 m, foi a ponte suspensa George Washington (Figura 17), em Nova Iorque, construída em 1931. Esta ponte foi projectada por Othmar H. Ammann, que utilizou quatro cabos de aço com 91cm de diâmetro e com 20.000 fios cada ^[6].



Figura 17 Ponte George Washington ^[1]

Outras pontes de referência dentro deste sistema estrutural são a ponte de Brooklyn (Figura 18), construída em 1883 e considerada uma obra-prima da engenharia, e a ponte Golden Gate (Figura 19), construída por Joseph Strauss no ano de 1937, em São Francisco, Califórnia. A ponte Golden Gate tem uma extensão de 1.281 m e é, sem dúvida, a mais conhecida de todas as pontes suspensas.



Figura 18 Ponte de Brooklyn [1]



Figura 19 Ponte Golden Gate [1]

O tipo de estrutura mais recente nas pontes metálicas é a ponte atirantada. Embora este tipo de ponte seja usualmente enquadrado dentro das pontes suspensas devido ao seu aspecto visual, na realidade o seu comportamento é muito mais similar a uma ponte em viga contínua, sobre apoios relativamente elásticos. Estes apoios elásticos são fornecidos pelos tirantes em vários pontos do tabuleiro e permitem a construção de grandes vãos com vigas relativamente finas [6].

A primeira ponte atirantada foi construída na Alemanha, a ponte Theodor Heuss (Figura 19), em 1957. Esta ponte em aço foi projectada por F. Tamms e F. Leonhardt com vãos de 108+260+108 m.



Figura 20 Ponte Theodor Heuss [1]

4.3 Pontes em viga

Em 1844, os caminhos-de-ferro britânicos decidiram construir uma linha ferroviária entre Londres e a ilha Anglesey, no País de Gales. Para tal ser possível, foi necessário construir uma ponte sobre o Estreito de Menai. Esta ponte foi encomendada a Stephenson, que, após estudar as pontes em arco e as pontes suspensas por correntes de ferro (ponte pênsil), decidiu construir uma ponte com a forma de dois tubos rectangulares, nos quais poderiam passar as duas vias do caminho-de-ferro. Foi então construída a ponte Britannia (Figura 21), sobre o estreito de Menai, em 1850. Esta ponte em ferro pudelado demonstrou que vigas compostas, com reforços espaçados, eram suficientemente resistentes para suportar um vão com mais de 142 m, sem recurso a diagonais de reforço. Assim surgiu a construção com vigas de alma cheia e foi dado o primeiro passo rumo às pontes em viga caixão ^[6].



Figura 21 Ponte Britannia ^[1]

Não se sabe bem quando foi construída a primeira ponte em viga treliça, mas uma das primeiras e maiores pontes da Europa com este sistema estrutural foi construída em 1857, a ponte Tczew (Figura 22), projectada por Carl Lentze. Esta ponte em ferro pudelado foi fortemente influenciada pela ponte Britannia e tem seis vãos de cerca de 131m.

A ponte que serviu como modelo para as pontes de vigas em treliça dos caminhos-de-ferro foi a ponte Saint-Jean (Figura 23), construída em Bordéus no ano de 1860 ^[3].



Figura 22 Ponte Tczew^[1]



Figura 23 Ponte Saint-Jean^[1]

O viaduto de Grandfey (Figura 24), construído na Suíça em 1862, é considerado a primeira estrutura em treliça com os elementos em compressão bem adaptados^[6]. Esta ponte em ferro pudelado tinha sete vãos de 49m e a sua montagem consistiu no lançamento do tabuleiro em treliça sobre os pilares metálicos.

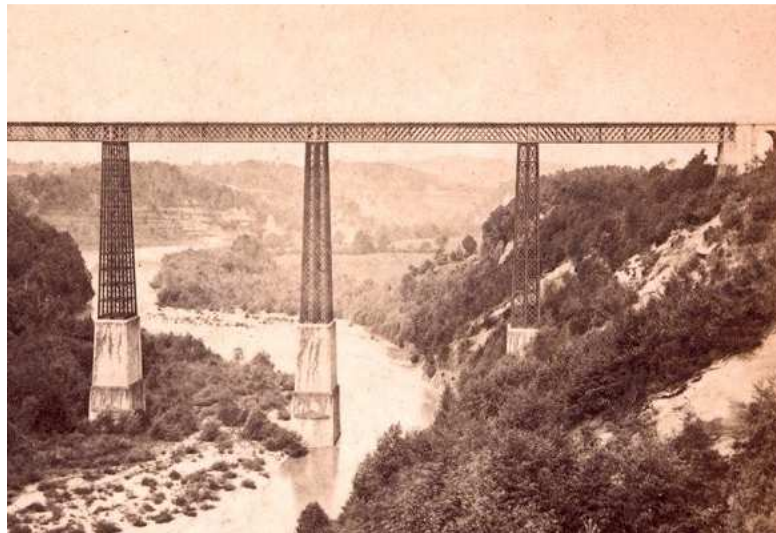


Figura 24 Viaduto de Grandfey^[1]

A construção de pontes em treliça foi desenvolvida exaustivamente por Gustave Eiffel, que construiu muitas pontes para os caminhos-de-ferro franceses e portugueses, e.g. viaduto de Garabit (Figura 8) e várias pontes da Linha da Beira Alta.

A ponte Britannia foi um excelente exemplo para o impulso da construção de pontes em viga caixão, que surgiu a partir do desenvolvimento da soldadura, por volta de 1925. No início da utilização deste tipo de ligações houve muitos problemas causados por fenómenos de fadiga, que na altura ainda não eram conhecidos. No entanto, após o período inicial de aprendizagem, houve um aumento muito rápido do comprimento dos vãos, como, por exemplo, a ponte sobre o rio Reno, na Alemanha, construída em 1948 com vãos de 99, 196, 99m^[6].



Figura 25 Ponte sobre o rio Reno ^[1]

4.4 Pontes em consola

No séc. XIX, as pontes com vários vãos eram quase todas divididas, sobre os pilares, em vãos únicos. Nessa época, já existia conhecimento dos benefícios, a nível de comportamento estático, das vigas contínuas. No entanto, esta solução não era utilizada devido aos problemas que acarretava para o dimensionamento das fundações. Este obstáculo foi resolvido por volta de 1868, quando German H. Gerber tem a ideia de introduzir juntas em vigas contínuas. O princípio das “vigas de Gerber” é aplicado na solução estrutural tipo *cantilever* ^[6].

A construção de pontes em consola ou tipo *cantilever* consiste, essencialmente, em aumentar a altura da viga em treliça para o nível dos pilares, tornando possível a construção das consolas a meio vão, sem ser necessário recorrer a qualquer tipo de escoramento. Esta técnica construtiva é particularmente útil quando se pretende atravessar águas profundas e/ou agitadas.

Uma das maiores e mais representativas pontes em consola é a ponte Firth of Forth, na Escócia. Esta ponte em aço foi projectada por Sir Benjamin Barker e Sir John Fowler e construída em 1883-1890, tornando-se na ponte com maior vão do mundo da época, com 521m.



Figura 26 Ponte Firth of Forth ^[1]

4.5 Pontes mistas

Uma das soluções estruturais mais aplicadas actualmente é a da ponte mista (Figura 27). Este tipo de ponte utiliza o betão e o aço, tirando partido das melhores características de cada um deles e, normalmente, temos um tabuleiro metálico com pilares e laje de betão. A construção de pontes mistas oferece diversas vantagens, tais como leveza, facilidade de construção, protecção atmosférica do aço pelo betão e bom comportamento dinâmico.



Figura 27 Solução estrutural - ponte mista

5 PONTES EM PORTUGAL

A primeira estrutura metálica a ser construída em Portugal foi o Viaduto de Xabregas (Figura 2), em ferro fundido, projectado por John Sutherland Valentine. A construção de grandes pontes metálicas em Portugal tem início com a construção da ponte ferroviária da Praia do Ribatejo sobre o rio Tejo (Figura 28), em 1862, que entretanto foi substituída pela actual Ponte da Praia ^[3]. Relativamente a pontes metálicas projectadas por portugueses, a mais antiga é a ponte da ribeira de Noemi, projectada por Bento d'Eça, José Garção e José de Andrade e inaugurada em 1876 ^[7].



Figura 28 Ponte da Praia do Ribatejo

A partir de 1870, generaliza-se o modelo de ponte em viga treliça, com tramos rectos e perfis cruzados de rótula simples ou múltipla. Pouco tempo depois, em 1872, também começa a ser utilizado outro tipo de solução estrutural, as pontes em viga utilizando o sistema Schwedler. Este sistema é uma variação das pontes em arco atirantadas, consistindo em vigas com o banzo inferior recto e o superior parabólico ^[3]. Dois exemplos deste tipo de pontes são a ponte da Régua (Figura 29) e a ponte da Portela (Figura 30), construídas em 1872 e 1873, respectivamente.



Figura 29 Ponte da Régua



Figura 30 Ponte da Portela

A ponte D. Maria Pia e a ponte Luís I, no Porto, são, sem dúvida, duas das mais importantes pontes metálicas construídas em Portugal. Estas pontes tiveram um papel significativo no desenvolvimento do país, ao encurtar a distância entre o norte e o sul, e ao contribuir para a

evolução da tecnologia de construção, principalmente a ponte D. Maria Pia. Esta ponte foi o primeiro grande sucesso de Eiffel na implementação de uma das suas ideias, a preparação de obra na construção metálica, desde a concepção até à pormenorização [6].

A ponte D. Maria Pia (Figura 31), projectada por Gustave Eiffel e Théophile Seyrig, foi construída em 1878 e desactivada em 1991. Esta ponte tem um vão principal de 160 m e serviu de modelo para outras grandes obras de Eiffel, como o viaduto de Garabit (Figura 8). O reconhecimento da importância da ponte D. Maria Pia é demonstrado na atribuição do título de *Civil Engineering Historical Landmark* pela Ordem dos Engenheiros portugueses e pela *American Society of Civil Engineers*. Felizmente, neste momento está em curso um projecto que visa a sua reabilitação.

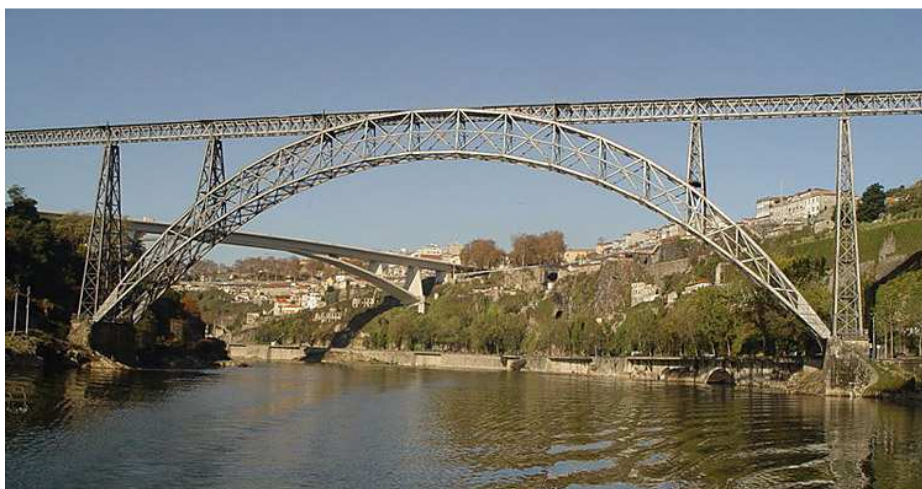


Figura 31 Ponte D. Maria Pia

Poucos anos após a construção da ponte D. Maria Pia, foi construída a ponte Luís I (Figura 32) que visava a substituição da ponte pênsil do Porto. A ponte Luís I foi construída em 1886 e é da autoria de Théophile Seyrig, um antigo colaborador de Eiffel. Esta ponte foi inicialmente projectada para servir o tráfego rodoviário e pedonal, mas recentemente foi alvo de obras de reforço, de modo a permitir a passagem do Metro do Porto. Esta obra é um excelente exemplo da capacidade de adaptação das pontes metálicas antigas às necessidades actuais, pois neste momento está a funcionar com cargas muito superiores às previstas inicialmente, no séc. XIX.



Figura 32 Ponte Luís I

Outra ponte construída na mesma altura das duas grandes pontes do Porto foi a ponte D. Luís, sobre o rio Tejo (Figura 33), em Santarém. Esta ponte foi, de algum modo, ofuscada pelas anteriores, mas também teve a sua importância no desenvolvimento do país. A ponte D. Luís foi construída em 1881 e projectada com uma estrutura em viga treliça por F. Moreaux ^[3]. Actualmente, esta ponte continua a servir o tráfego rodoviário após ter sido sujeita a uma intervenção de reforço da autoria do engenheiro Edgar Cardoso.



Figura 33 Ponte D. Luís

Além da ponte D. Maria Pia, Gustave Eiffel projectou mais de 20 pontes para os caminhos-de-ferro portugueses, na sua maioria em ferro pudelado e com uma estrutura de viga em treliça. Algumas das pontes referidas são as pontes do Milijoso, Breda, Criz, Dão e Trezói, em 1879-1881, pertencentes à Linha ferroviária da Beira Alta, a ponte do Fão, sobre o rio Cávado, em 1892, pertencente à Linha ferroviária do Minho, e principalmente a ponte Eiffel, em Viana do Castelo, que Eiffel sempre considerou a sua obra-prima.

A ponte Eiffel (Figura 34), em Viana do Castelo, construída em ferro pudelado, data de 1886 e divide-se numa estrutura metálica contínua com 562 m, de vigas de rótula múltipla, com dois

tabuleiros sobrepostos apoiados em pilares de alvenaria. Os viadutos de acesso também são constituídos por vigas contínuas, apoiadas transversalmente em pórticos múltiplos ^[3]. Esta ponte foi sujeita a obras de reforço há cerca de 20 anos e recentemente foi substituído o tabuleiro rodoviário.



Figura 34 Ponte Eiffel

A partir de 1927, construíram-se muitas pontes metálicas em Portugal, mas quase sempre com o mesmo tipo de solução estrutural. Prevalece, então, a construção de pontes em vigas metálicas rectas, de alma cheia ou rota, simples ou múltipla, apoiadas em pilares de pedra ou ferro fundido ^[3]. Uma das excepções foi a ponte 25 de Abril, construída em 1962-66.

A ponte 25 de Abril (Figura 35) é, actualmente, a mais importante e conhecida ponte metálica portuguesa. Esta ponte tem como nome original ponte Salazar e foi construída pelas empresas americanas United States Steel Export Company e Morrison-Knudsen Company, enquanto o projecto de dimensionamento ficou a cargo de Steinman, Boynton, Gronquist & London. Para esta obra de arte, foi adoptada uma solução de ponte suspensa, similar à ponte Golden Gate, de São Francisco.



Figura 35 Ponte 25 de Abril

A ponte 25 de Abril foi construída em aço com ligações aparafusadas e tem um tabuleiro em viga treliça contínua, com um comprimento total de cerca de 2.277 m, onde o vão principal tem cerca de 1.013 m, os dois vãos adjacentes 483 m e os dois viadutos 100 m. Esta viga de rigidez, em viga treliça contínua, tem 10,65 m de altura e 21m de largura e continua a ser uma das mais longas do mundo. Os cabos metálicos de suspensão consistem em 37 cordões de aço, compostos por 11.248 fios de 5mm de diâmetro paralelos, com um comprimento total de 54.196 km. Esta ponte também foi protegida contra a corrosão, nomeadamente através da galvanização e com esquemas de pintura ^[3]. Inicialmente, esta ponte abriu apenas ao tráfego rodoviário, no entanto a disposição dos espaçadores foi dimensionada para uma futura utilização ferroviária, como se pode verificar actualmente.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. em Novembro de 2010

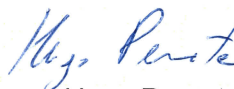
VISTOS

A Chefe do Núcleo de Materiais Metálicas



Maria Manuela Salta
Investigadora Coordenadora

AUTORIAS



Hugo Pernes
Bolsheiro de Investigação

O Director do Departamento de Materiais

Arlindo Gonçalves
Investigador Coordenador



6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Perna. Pontes Metálicas em Ambiente Marítimo: Metodologias de Avaliação, Reparação e Protecção. Universidade da Madeira. Funchal, 2010.
- [2] <http://en.structurae.de/index.cfm>
- [3] M. R. F. Martins, M. T. P. Torres, P. C. M. Freire. Pontes Metálicas Rodoviárias. Europress, Editores e Distribuidores de Publicações, Lda. MEPAT. SEOP, Junta Autónoma de Estradas. 1998.
- [4] J. D. de Andrade Gil. Pontes Metálicas Ferroviárias. I Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista. Porto, 1997.
- [5] H. Perna, M.J. Correia, A.M. Baptista, M. Salta. Reparação de Estruturas Metálicas. REABILITAR 2010 – Encontro Nacional de Conservação e Reabilitação de Estruturas. Lisboa, 2010.
- [6] A. Baptista, B. Tersin. *La rehabilitation des structures métalliques*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. *CUST. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France*.
- [7] Hélder Carita. Homem Cardoso. Pontes em Portugal. SECIL.

