



Estudo Comparativo entre Aço e Concreto Protendido no Dimensionamento da Superestrutura de uma Ponte Ferroviária
Glauco José de Oliveira Rodrigues, D.Sc.¹, José Antônio Otto Vicente, Esp.², Alex Leandro de Lima, M.Sc.³

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro / Faculdade de Engenharia Civil /
glauco.rodrigues@oi.com.br

² SF Engenharia / jaov74@gmail.com

³ Centro Universitário Augusto Motta / Faculdade de Engenharia Civil / alexleandro.eng@gmail.com

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre o dimensionamento da superestrutura de uma ponte ferroviária, cujo vigamento foi projetado em concreto protendido, e a alternativa composta por duas vigas metálicas constituídas por perfis “I” soldados de alma cheia, com seus devidos contraventamentos, mista com a laje em concreto armado. O projeto desta ponte ferroviária foi desenvolvido para a Companhia Vale do Rio Doce, e integra a Estrada de Ferro Vitória Minas, importante ferrovia de transporte de minério, que interliga os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. No dimensionamento estrutural, foi utilizada a NBR 8800:2008, bem como todas as verificações nela prescritas, além de “software” computacional para análise estrutural. Além do dimensionamento estrutural das longarinas em perfil “I” soldado, apresenta-se, ao final, uma tabela comparativa de custos entre a opção adotada (com vigamento principal em concreto protendido), e a alternativa proposta, em vigamento misto aço-concreto.

Palavras-chave

Pontes; Dimensionamento Estrutural; Estruturas de Aço.

Introdução

Este trabalho tem por objetivo principal, estabelecer uma comparação entre duas possibilidades de solução estrutural para elaboração do projeto de Obra de Arte Especial (OAE) de grande relevância, pois a mesma integra a Estrada de Ferro Vitória/Minas, importante ferrovia de transporte de minério que liga o estado de Minas Gerais ao do Espírito Santo.

Conforme o projeto executivo original, a superestrutura da OAE em questão, foi projetada em concreto protendido. Entretanto, devido ao custo final apresentado, foi sugerida uma avaliação da solução em aço estrutural, objetivando-se estabelecer comparação de custos para empreendimentos futuros.

O conteúdo deste trabalho consiste na apresentação detalhada do dimensionamento das vigas metálicas de alma cheia, conforme as prescrições da NBR 8800:2008, e a comparação quantitativa desta solução com a em concreto protendido, conforme projetado. Para determinação dos esforços na estrutura utilizou-se o “software” FTOOL (MARTHA, 2015).



Aços Utilizados nas Pontes Ferroviárias Brasileiras

As pontes ferroviárias brasileiras são, em sua grande maioria, construídas com aço carbono do tipo ASTM A242 ou ST37 (padrão alemão), similares ao ASTM A36, os chamados aços de média resistência, tendo tensão de escoamento da ordem de 240 MPa, sendo um pequeno número construídas em aço de alta resistência, como o USI-SAC-350 e o ASTM A588. Além disso, foi amplamente usado, em forma de chapas, o material conhecido como “ferro pacote”, que se trata de uma liga formada a partir da mistura a quente de vários tipos diferentes de aços.

Pontes Ferroviárias em Estrado

Nas pontes ferroviárias, o estrado é composto pelo vigamento secundário, longarinas e transversinas, e é responsável por receber diretamente os esforços oriundos da superestrutura da via permanente, ou seja, trilhos, dormentes e lastro. O estrado pode ser de dois tipos: estrado aberto, sem lastro e estrado fechado, com ou sem lastro. No estrado aberto, os dormentes apoiam-se diretamente sobre o vigamento. No fechado, existe uma laje de concreto ou uma chapa de aço, sobre a qual é colocado o lastro de pedra ou os dormentes diretamente.

A solução em estrado aberto é mais leve e econômica, sendo usada correntemente, enquanto que o fechado, com lastro de pedra, torna a ponte equivalente ao terrapleno, assegurando a uniformidade da via, com vantagens para sua manutenção.

Conforme sua posição relativa às vigas principais, o estrado ainda pode ser classificado em superior, médio ou inferior, conforme mostra a Figura 1. O estrado superior fica colocado sobre as vigas principais (Figura 1a), enquanto o estrado médio ou o inferior fica situado entre as mesmas (Figuras 1b e 1c, respectivamente). Neste último caso, a altura acima da linha pode ser livre ou limitada por contraventamento horizontal superior. A solução em estrado superior é geralmente mais econômica, pois as cargas originadas pelo trem transferem-se diretamente às vigas principais. Entretanto, a solução com estrado médio ou inferior, permite ocupar menor espaço abaixo da via, uma vez que a altura da viga se desenvolve nos lados da linha.

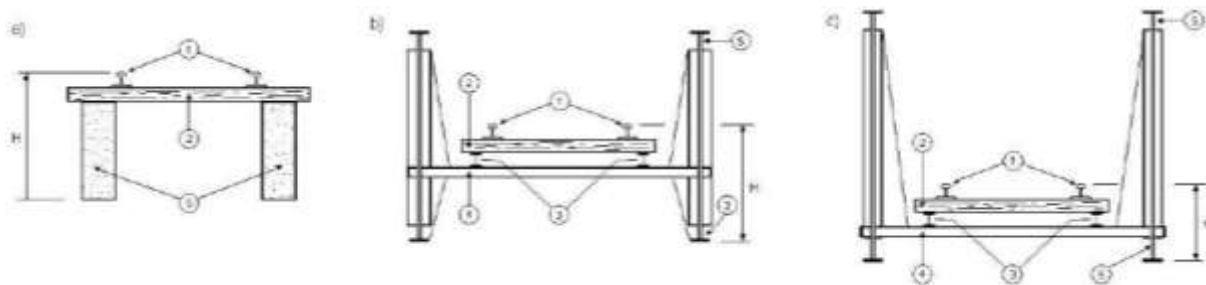


Figura 1 – Classificação do estrado quanto à posição relativa às vigas (1-trilho, 2-dormente, 3-longarina, 4-transversina, 5-viga principal, H-altura da construção).

Tabuleiro Ferroviário Misto

Os tabuleiros das pontes podem ser construídos em concreto protendido, totalmente em aço ou mistos aço-concreto. A avaliação técnico-econômica depende de vários fatores, tais como os vãos, o processo construtivo, as condições geotécnicas, os aspectos econômicos (custos de construção e manutenção), o prazo de construção, a estética e integração paisagística.

As pontes com tabuleiros mistos aço-concreto procuram uma solução em que se aperfeiçoam as melhores características de cada um dos materiais, onde o concreto é um material com grande resistência à compressão e o aço à tração. A conjugação dos dois materiais conduz a uma solução com uma boa combinação de resistência, ductilidade e durabilidade.

A experiência tem demonstrado que as pontes com tabuleiros mistos aço-concreto, em comparação com soluções de concreto protendido, apresentam alguns benefícios, tais como redução das cargas permanentes, ou seja, menor peso próprio do tabuleiro que traduz menores esforços; redução no custo de pilares, de fundações, de aparelhos de apoio; redução das ações sísmicas e redução do prazo de execução, o que pode ser um critério determinante na escolha de uma dada solução.

Contudo, as soluções de tabuleiros mistos aço-concreto apresentam também algumas desvantagens relevantes que devem ser levadas em consideração na decisão de escolha da solução, que são: maior custo inicial devido ao custo do aço estrutural e à necessidade de mão-de-obra mais qualificada para a sua montagem; custos de manutenção mais elevados para garantir o bom funcionamento da proteção do aço exposto e exigência de uma maior tecnologia construtiva.

Tabuleiro Ferroviário em Viga Mista

Conforme apresentado na Figura 2 a seguir, a solução estrutural de um tabuleiro em viga mista consiste em uma laje de concreto, eventualmente protendida transversalmente; duas vigas de alma cheia, cuja ligação à laje de concreto é feita através de conectores, reforçadas transversalmente e longitudinalmente; um sistema de contraventamento vertical entre vigas e um sistema de contraventamento horizontal ao nível do banzo inferior.

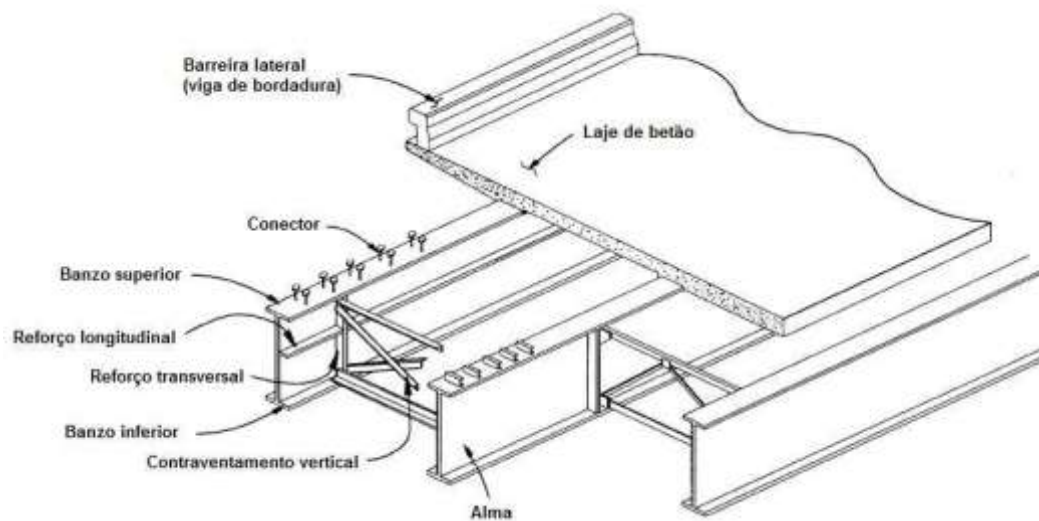


Figura 2 – Componentes de um tabuleiro misto.

Dados do Projeto

A ponte considerada é uma estrutura isostática biapoiada de 20 m de vão em estrutura mista aço-concreto. O tabuleiro possui largura total de 6 m, sendo dois passeios de 0,65 m e uma caixa de brita de 4,70 m.

A infraestrutura é em fundação indireta, através de estacas escavadas com diâmetro de 1,10 m. Já a mesoestrutura é constituída por paredes em concreto armado.

Na transmissão dos esforços verticais, horizontais, transversais e longitudinais, estão previstos aparelhos de apoio de elastômero fretado.

O trem-tipo de cálculo é o TB360 (NBR 7189, 1985), o aço estrutural é o ASTM A588 e o concreto estrutural é o C30. O perfil metálico, considerado, é o VS 1800×511. Os conectores pino, com cabeça, é o ASTM A108-Grau 1020.

A Figura 3 apresenta a seção transversal, enquanto que a Figura 4 apresenta detalhes da superestrutura da ponte.

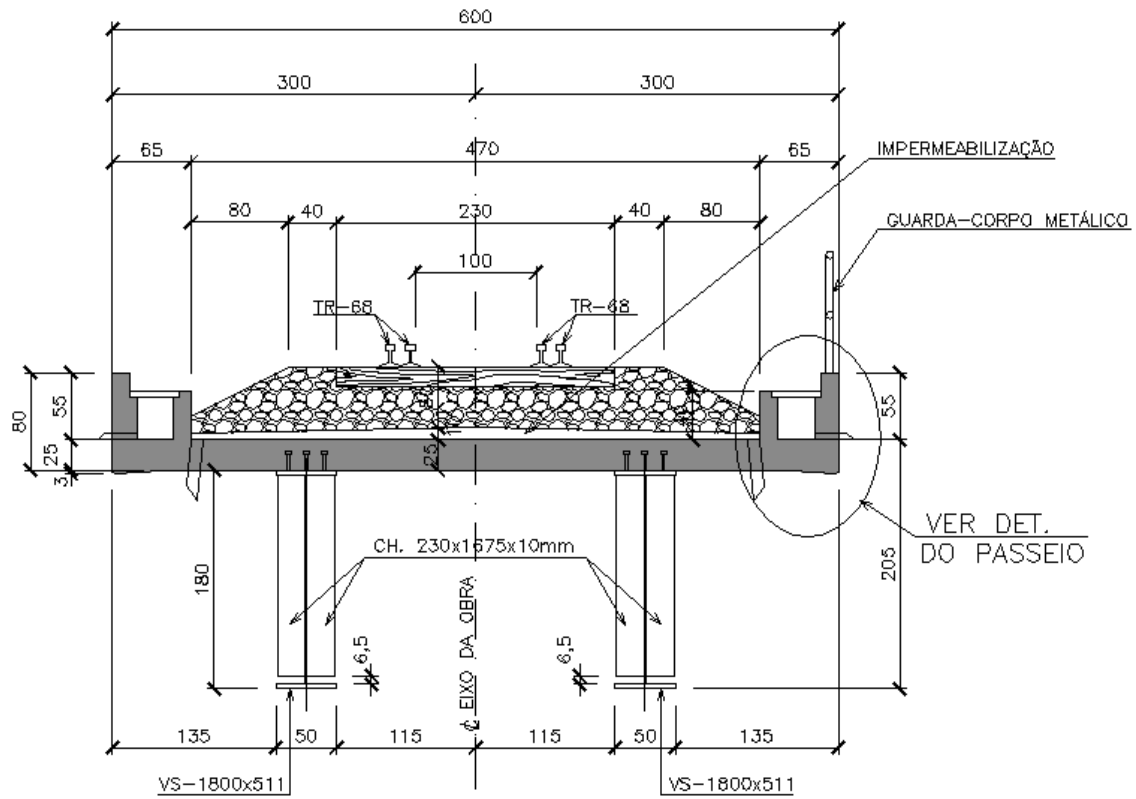


Figura 3 – Seção Transversal da Ponte.

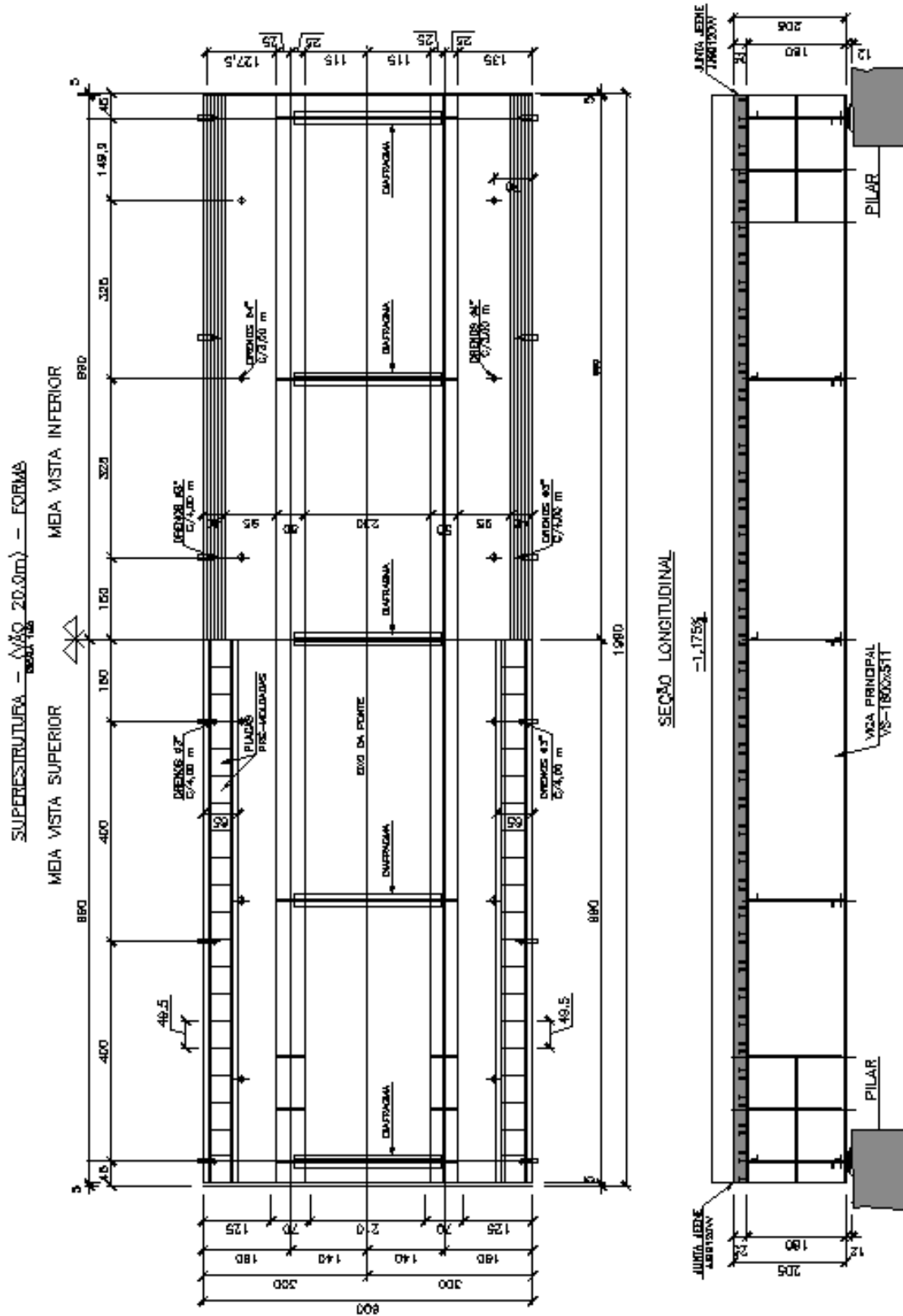


Figura 4 – Superestrutura da Ponte.



Considerações de Cálculo

A verificação à flexão, cisalhamento, deformação, fadiga, solda e conectores de cisalhamento, foram feitos à luz da NBR 8800:2008, que trata do método dos estados limites. Sobretudo o anexo O, desta mesma norma, por se tratar de uma estrutura mista aço-concreto.

As características do concreto estrutural, para fins de dimensionamento, foram obtidas da NBR 6118:2014, bem como seu completo dimensionamento.

Com relação ao momento fletor de cálculo em regiões de momentos positivos, levou-se em conta a distribuição de tensões em interação completa, tem O.2.3 da NBR 8800:2008.

Resultados e Discussões

De acordo com a NBR 8800:2008, a segurança para um determinado esforço é garantida quando:

$$R_d \geq S_d \quad (1)$$

R_d é o esforço resistente de cálculo e S_d é a solitação mais desfavorável.

O dimensionamento mostrou que o momento solicitante é menor que o momento resistente, sendo $M_{sd} = 10876$ kNm e $M_{Rd} = 16870$ kNm, ou seja, o perfil é solicitado somente 65%.

Com relação ao cisalhamento, faz-se necessário a utilização de enrijecedor de alma (Figura 4). Isso faz com que a seção ganhe mais resistência.

Quanto aos conectores pino com cabeça, é necessário um total de 109 conectores para atender ao cisalhamento na interface da mesa do perfil com o concreto da laje.

Com relação as outras verificações, todas foram atendidas satisfatoriamente.

Por fim, para se fazer a comparação proposta neste trabalho, é apresentado na Tabela 1 a seguir, o quantitativo de matérias empregados nas duas soluções para a ponte ferroviária (longarinas em concreto protendido e longarina em aço), em termos de peso.

Tabela 1 – Comparativo dos pesos totais das soluções.

Longarina Protendida	Longarina em Aço
226070 kg	108672 kg

Percebe-se que a solução em viga mista aço-concreto apresenta menor peso total se comparada com a solução em viga protendida. Isso impactará diretamente no custo total, apontando para uma solução mais econômica se utilizar viga mista.

Conclusões

Conforme apresentado anteriormente na Tabela 1, pode-se notar que, traduzidos em peso total e, considerando-se os custos unitários dos materiais empregados, a solução em vigamento misto aço-concreto, é menos custosa que a alternativa por vigamento em concreto protendido. Além, é claro, de um grande alívio no peso total da estrutura, que acarretará em uma mesoestrutura e uma infraestruturas menos carregadas e, conseqüentemente, igualmente menos custosas.

Vale ressaltar que, esta conclusão, refere-se exclusivamente ao caso particular analisado no presente trabalho que não possui qualquer pretensão de afirmar ser possível a extrapolação da mesma, devendo cada caso ser analisado individualmente.



Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7189 – Cargas Móveis para Projeto Estrutural de Obras Ferroviárias, Rio de Janeiro. 1985.
- _____.NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço e Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios, Rio de Janeiro. 2008.
- _____.NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, Rio de Janeiro. 2014.
- CBCA, Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro. Aços Estruturais. Disponível em: <http://www.cbca-ibs.org.br/aços_estruturais.asp>. 2005. Acesso em 17 nov.
- KLINSKY, G.E.R. G. Uma Contribuição ao Estudo das Pontes em Vigas Mistas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, USP, São Carlos, 1999.
- MARTHA, L. F. Two Dimensional Frame Analysis Tool - FTOOL. www.tecgraf.puc-rio.br/ftool. 2015.
- MASON, J. Pontes Metálicas e Mistas em Viga Reta – Projeto e Cálculo. Rio de Janeiro, McGraw-Hill, 1976.
- MASON, J.; GHAVAMI, K. Development in Brazilian Steel Bridge Construction. Journal of Steel Constructional Research, v. 28, p. 81-100, 1994.
- PINHO, F.O. Projeto de Pontes Metálicas. Volta Redonda, RJ, Curso de capacitação - Escola de Engenharia e Informática de Volta Redonda, 1998.
- RFFSA IVO-04. Manual de Inspeção de Pontes e Viadutos Ferroviários. Normas e Instruções Gerais de Via Permanente, vol. 1. Rio de Janeiro, 1979.