



IX CONGRESSO DE
Construção Metálica
e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

PROJECTO DE UM VIADUTO PARA UMA MINA NO BRASIL

Fernando Stucchi 1^a, António Adão da Fonseca 2^b, Francisco Millanes Mato 3^c, Marcelo Waimberg 4^a, Pedro Moás 5^b, Pablo Solera 6^c, João Adão da Fonseca 7^b

^a EGT Engenharia, Lda

^b AdF – Engenheiros Consultores, Lda

^c IDEAM S.A.

Resumo. Nesta comunicação, apresenta-se o projecto de execução de um viaduto (viaduto principal mais viadutos de acesso) integrado no programa de exploração de uma mina de propriedade da empresa mineradora VALE S.A., para ser executado no Brasil.

Estruturalmente, o viaduto principal é composto por uma superestrutura contínua de quatro vãos de grandes dimensões (97,50 m + 170,00 m + 170,00 m + 97,50 m) e será construído pelo método dos avanços sucessivos. O acesso das viaturas ao viaduto é feito lateralmente por dois viadutos mistos aço-betão simplesmente apoiados com 40,5 e 29,0 m de vão, sendo que um deles é de curvatura acentuada – R=40,0 m.

1. Introdução

A empresa mineradora VALE S.A. é hoje em dia a 12^a maior empresa do mundo, ocupando a segunda posição mundial como empresa mineira. Actualmente, esta empresa está presente em 37 países e detém mais de 10.000 km de linha ferroviária própria, 9 terminais portuários próprios e emprega mais de 41 mil pessoas. [1]

Com o aumento da procura mundial por minério de ferro, a empresa mineradora VALE S.A. decidiu aumentar a sua capacidade exploradora, investindo numa nova mina no estado de Minas Gerais, no Brasil, sendo, neste contexto, que surge a necessidade de construir um viaduto de grandes dimensões que permita a ligação entre a planta de beneficiamento e tratamento dos minérios e a área de britagem primária e secundária.

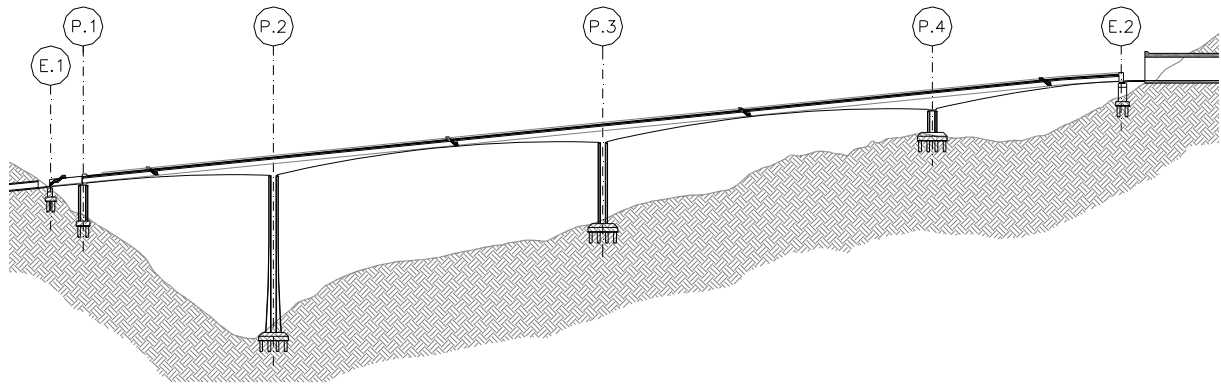
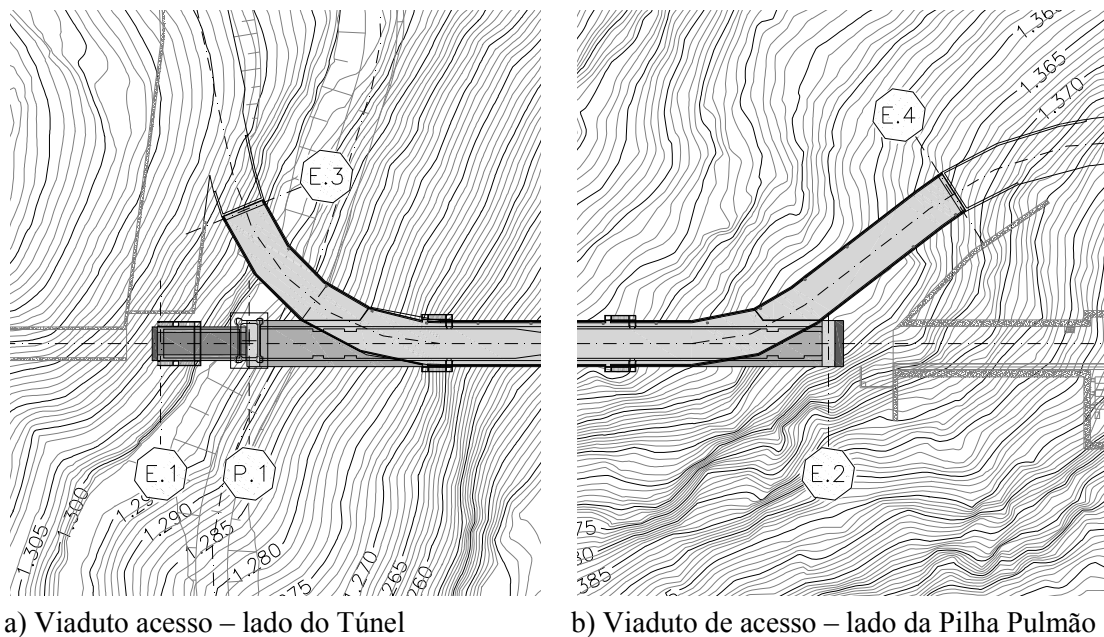


Fig. 1: Alçado do viaduto de ligação entre as áreas de britagem e a planta de beneficiamento

Os viadutos projectados incluem o viaduto principal em betão armado pré-esforçado e dois viadutos de acesso mistos aço-betão.

Além de permitir a circulação de veículos, o viaduto principal comporta ainda no interior do seu caixão uma correia transportadora, garantindo assim o transporte de minério entre as zonas já citadas.



a) Viaduto acesso – lado do Túnel

b) Viaduto de acesso – lado da Pilha Pulmão

Fig. 2: Plantas dos extremos do viaduto principal – zona dos viadutos de acesso

2. Solução adoptada

2.1 Concepção

A necessidade de construir um viaduto a grande altura com reduzido impacto ambiental e esteticamente equilibrado num vale assimétrico e com uma das encostas de inclinação bastante acentuada recomendava a adoção de uma obra de arte dotada de grandes vãos que respeitasse e conciliasse as exigências estéticas com as económicas e ambientais. Assim, optou-se por um tabuleiro em viga caixão de altura variável construído pelo método dos avanços sucessivos a partir dos pilares P.2, P.3 e P.4. Esta solução permitiu reduzir ao mínimo o número de

pilares de grande altura e, conseqüentemente, os trabalhos para execução das fundações e o número de frentes de obra a decorrer em simultâneo.

Tanto do lado do Túnel como do lado da Pilha Pulmão, o acesso ao viaduto principal dos veículos rodoviários é feito por meio de viadutos de acesso laterais, conforme se pode observar pelas “Fig. 2” e “Fig. 3”.

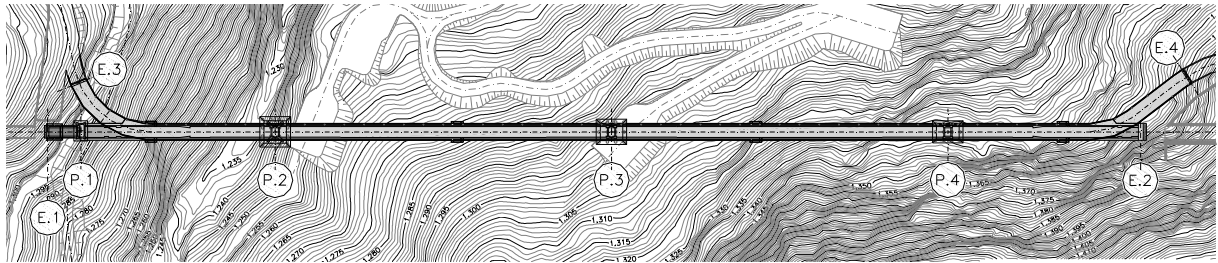


Fig. 3: Planta geral

Para facilitar o processo construtivo destes viadutos de acesso, evitando-se escoramentos de grande altura em terrenos muito acidentados, propôs-se uma solução em caixão misto aço-betão, permitindo-se, desta forma, que estes viadutos possam ser colocados nas suas posições finais recorrendo-se apenas a guias de grande capacidade que, a partir dos encontros e do viaduto principal já construído, colocarão os caixões metálicos na sua posição final. Em seguida, assentar-se-ão as lajes pré-fabricadas sobre as quais se betonará *in-situ* a plataforma de circulação rodoviária.

2.2 Viaduto principal

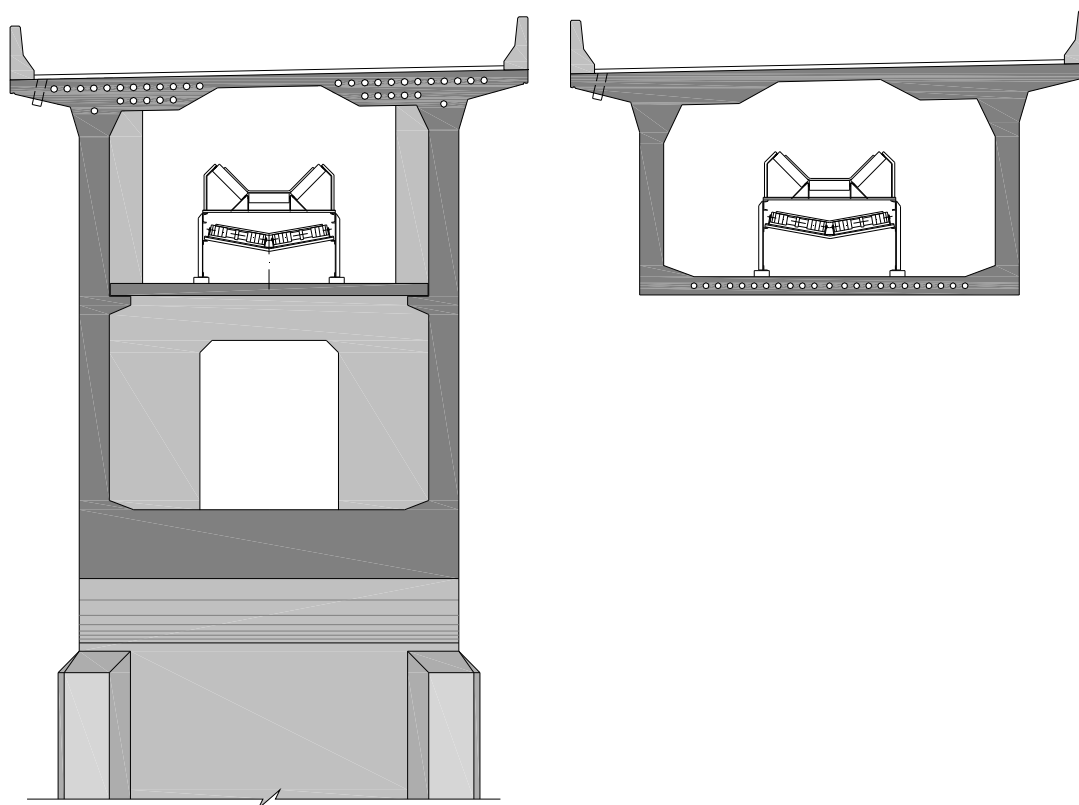
2.2.1 Tabuleiro

O viaduto principal, como se pode observar pela “Fig. 1”, é composto por uma superestrutura contínua de quatro vãos de grandes dimensões mais um pequeno troço isostático. O tabuleiro em betão armado pré-esforçado, do tipo viga caixão de altura variável entre 9,50 m e 3,75 m, desenvolve-se ao longo de 554,0 m com uma pente constante de 10% em quase toda a sua extensão e com a seguinte divisão de vãos:

$$16,75 \text{ m} + 97,50 \text{ m} + 170,00 \text{ m} + 170,00 \text{ m} + 97,50 \text{ m}$$

O tabuleiro é constituído por um caixão monocelular em betão armado pré-esforçado, de altura variável entre 9,50 m sobre os pilares e 3,75 m a meio vão, que será construído a partir das aduelas de encabeçamento dos pilares por troços de 4,0 m e 5,0 m betonados *in-situ* em consola e avançando sempre simetricamente em relação ao eixo de cada pilar, até ao fim da aduela 17. Nos extremos, junto ao pilar P.1 e ao encontro E.2, serão executados troços cimbrados com 9,50 m de extensão. Terminada a construção das consolas, a continuidade do tabuleiro é estabelecida com a betonagem das aduelas de fecho, cujo comprimento é de 4,0 m nos vãos centrais e 5,0 m nos vãos extremos. Nos vãos centrais, esse fecho liga as duas consolas adjacentes.

A secção transversal do tabuleiro é, como se pode apreciar na “Fig. 4”, constituída por duas almas, com espessura variável entre 0,50 m e 0,40 m, ligadas inferiormente por uma laje, também de espessura variável decrescente dos pilares para o meio vão com 6,30 m de largura, e, superiormente, pela laje que comporta a faixa de rodagem, as bermas e as guardas de segurança, com uma largura total de 8,6 m.



a) Secção transversal – sobre pilar

b) Secção transversal – meio vão

Fig. 4: Secções transversais

O tabuleiro é pré-esforçado longitudinalmente com três famílias de cabos:

- i) Os cabos das consolas dispostos na face superior do tabuleiro e colocados à medida que são executadas as sucessivas aduelas;
- ii) Os cabos de solidarização nas zonas centrais dos vãos para estabelecer a continuidade do tabuleiro;
- iii) Os cabos parabólicos dos vãos extremos para momentos positivos, colocados nas almas.

Transversalmente, a secção é armada apenas com armaduras passivas, pois comprovou-se que a resistência transversal é por elas garantida de forma económica e satisfatória relativamente aos ELU e ELS.

2.2.2 Ligação tabuleiro-pilares

A ligação do tabuleiro aos pilares é feita monoliticamente no caso dos pilares P2 e P3. No caso dos pilares P1 e P4, a ligação é materializada por meio de apoios tipo “pot-bearing” com restrição apenas dos movimentos transversais.

2.2.3 Ligação tabuleiro-encontros

A ligação do tabuleiro aos encontros é feita, à semelhança da ligação aos pilares P1 e P4, por meio de apoios tipo “pot-bearing” com restrição apenas dos movimentos transversais.

2.2.4 Pilares

Os pilares, um por eixo de apoio do tabuleiro, são construídos em betão armado. Para a secção transversal dos pilares, optou-se por uma solução semelhante à criada e utilizada pelo Engenheiro Armando Rito em várias obras, nomeadamente na ponte Miguel Torga sobre o rio Douro, na ponte de Vila Pouca de Aguiar e na nova ponte sobre o rio Tua.

O pilar P1 é formado por uma secção transversal oca e inscreve-se num rectângulo com dimensões constantes e iguais a 8,15 m x 4,90 m. Os pilares P2, P3 e P4 são formados por uma secção transversal também oca inscrita dentro de um retângulo com dimensões constantes e iguais a 7,00 m x 4,90 m. O pilar P2 tem uma secção transversal semelhante, mas constante apenas na parte superior do seu fuste, aumentando as suas dimensões, segundo uma variação parabólica, para baixo dos 45 m medidos a partir da sua base. Na parte superior, a secção transversal inscreve-se dentro de um rectângulo com dimensões constantes e iguais a 7,00 m x 4,90 m. Na parte inferior, a secção vai alargando à medida que se aproxima da sua base, onde o rectângulo circunscrito tem as dimensões de 10,20 m x 8,10 m. Esta variação é feita apenas à custa do alargamento das nervuras nos cantos da secção do pilar. As almas dos pilares P1 e P4 têm uma espessura constante de 0,40 m, enquanto os pilares P2 e P3 têm almas de 40 cm de espessura. Todos os pilares são fundados sobre estacas.

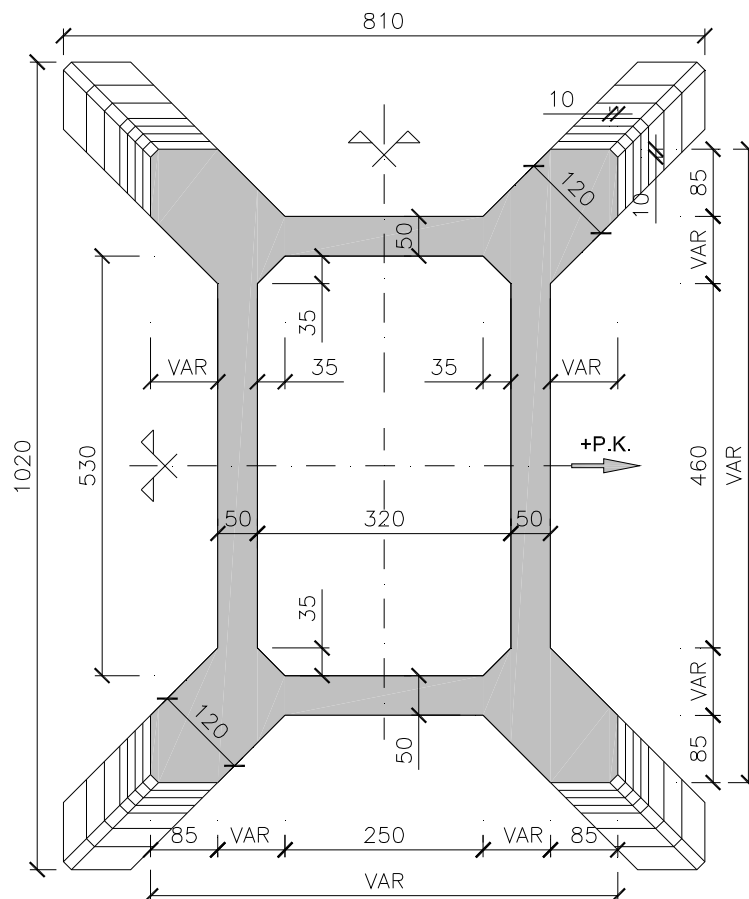


Fig. 5: Secção transversal do pilar P2

2.2.5 Encontros

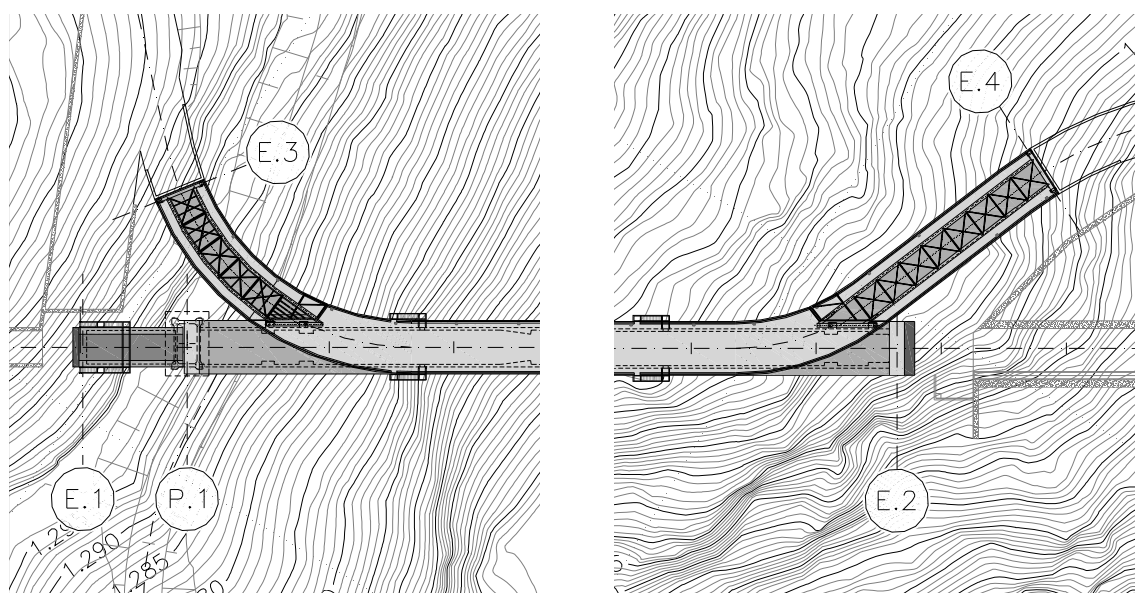
Todos os encontros são em cofre, em forma de “U”. São fundados sobre estacas e dispõem lateralmente de muros de ala.

2.3 Viadutos de acesso

2.3.1 Tabuleiro

Os viadutos de acesso à plataforma superior do viaduto principal são vigas mistas aço-betão simplesmente apoiadas entre os encontros E3 e E4 e o próprio tabuleiro do viaduto principal. Estes viadutos permitem a circulação de tráfego rodoviário sem interferências com a correia transportadora de minério e as áreas de beneficiamento e britagem dos minérios.

Como se pode observar pela “Fig. 6”, estes viadutos garantem o acesso lateral à plataforma superior do viaduto diretamente a partir das encostas abruptas tanto do lado do túnel como do lado da pilha pulmão.



a) Lado do Túnel – vão de 29,0 m e $R = 40$ m

b) Lado da Pilha Pulmão – vão 40,5 m

Fig. 6: Plantas dos viadutos de acesso lateral para tráfego rodoviário

Tanto para um lado como para o outro, optou-se por uma viga mista aço-betão em caixão que por um lado permitisse uma construção rápida e segura e por outro não representasse uma carga permanente muito elevada sobre as almas dos vãos extremos do viaduto principal.

O caixão metálico tem 2,0 m de altura e uma largura de 3,90 m na face inferior e 4,90 m na zona superior. A laje que suporta a plataforma de circulação tem, à semelhança do viaduto principal, 8,60 m de largura e 25 cm de espessura.



Fig. 7: Secção transversal dos viadutos de acesso

Ao longo do comprimento dos dois viadutos, de forma a limitar o fenómeno de distorção do caixão metálico e de modo a assegurar uma incorporação eficaz das cargas exteriores excêntricas no sistema estrutural resistente, dispuseram-se pórticos verticais de rigidez espaçados de 4,80 m no caso do viaduto do lado do Túnel, e de 4,50 m no caso do lado da Pilha Pulmão.

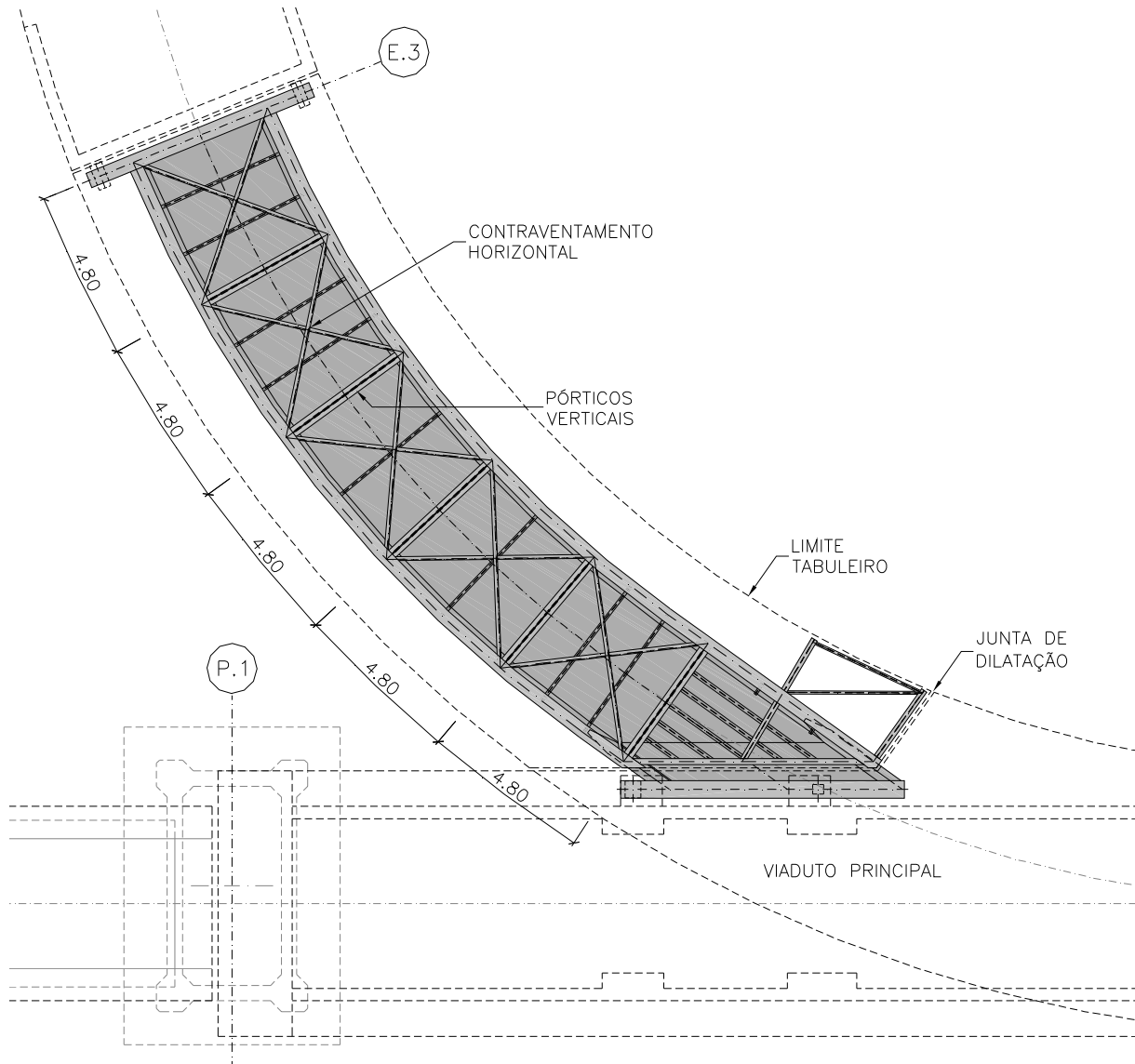


Fig. 8: Planta do caixão metálico do viaduto de acesso do lado do Túnel

Estes pórticos, além de respeitarem as condições mínimas geométricas recomendadas pela regulamentação actual, foram dimensionados de forma económica considerando apenas as condições de resistência. Actualmente, e de acordo com J. Pascual Santos [2], o dimensionamento deste tipo de elementos estruturais pode dispensar o cumprimento das condições de rigidez recomendadas por diversas normas, desde que, além de se assegurar a sua resistência em ELU, sejam cumpridas certas condições geométricas. No mesmo sentido, a última edição da EAE (Instrucción de Acero Estructural; Madrid 2011), no anexo 3, permite a dispensa da mesma verificação.

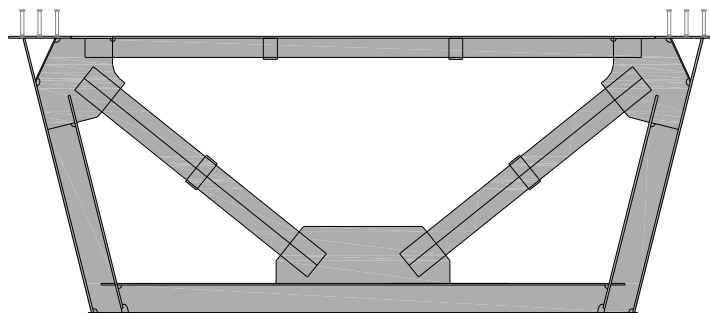


Fig. 9: Pórtico vertical de rigidez

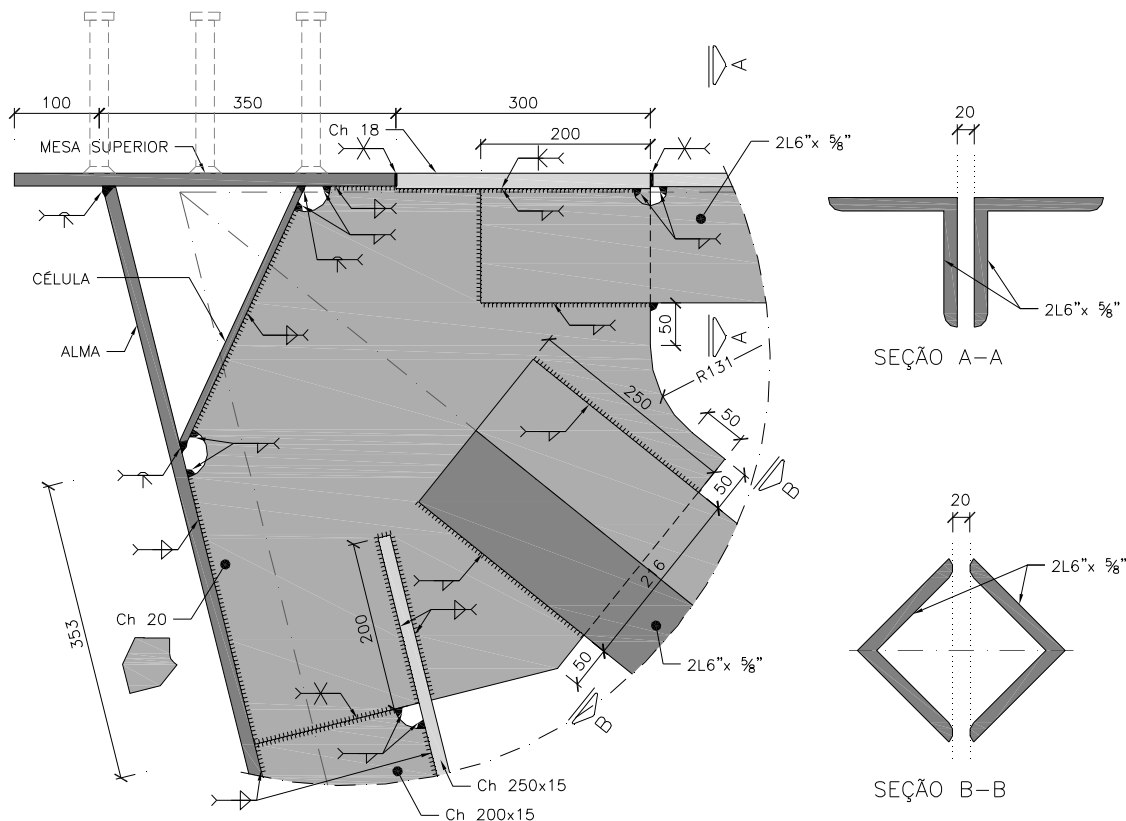


Fig. 10: Detalhe de nó de ligação

Além dos pórticos verticais, dispôs-se ainda uma treliça horizontal ao nível dos banzos superiores. Desta forma materializa-se um contraventamento horizontal para os banzos superiores do caixão e garante-se uma secção fechada que possibilita a existência de um fluxo de tensões tangenciais que resista ao momento torsor actuante durante a fase construtiva devido ao vento e à própria curvatura em planta da viga.

Ao longo dos banzos superiores, colocou-se ainda uma chapa longitudinal de reforço – célula (ver “Fig. 10”), de forma a melhorar a classificação da secção (banzo e alma) e de modo a baixar a altura do subpainel principal das almas, conseguindo-se assim a verificação em serviço do fenómeno de respiração de alma de forma mais económica.

2.3.2 Zona de transição entre viadutos

A zona de transição entre viadutos, por ser um extremo da viga mista apoiado em viés, é uma zona delicada do ponto de vista estrutural que foi estudada cuidadosamente.

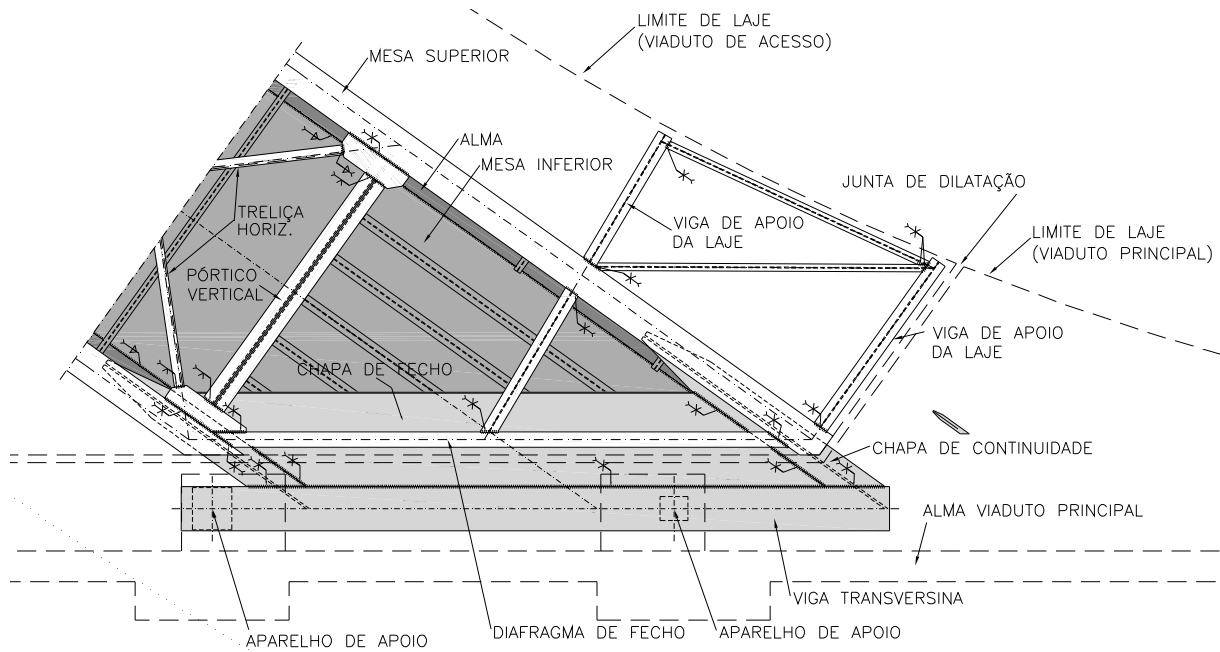


Fig. 11: Apoio enviesado do viaduto de acesso no viaduto principal

Neste tipo de vigas simplesmente apoiadas com apoios enviesados num ou nos dois extremos, os esforços que se obtêm – momentos flectores e momentos torsores – são muito dependentes da relação de rigidez de torção e flexão, tanto da viga estribo como da viga principal.

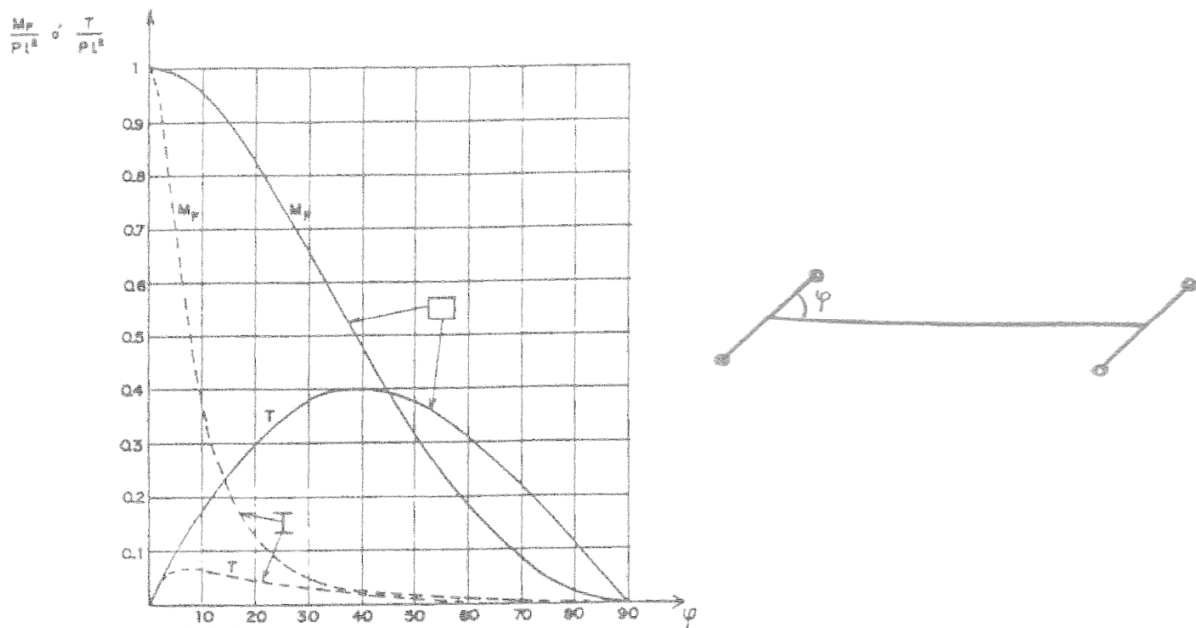
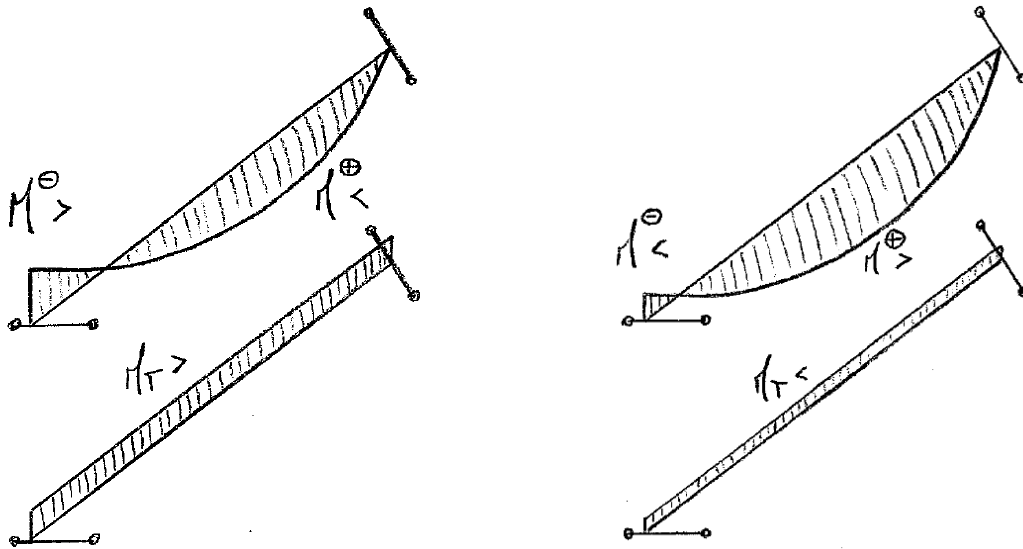


Fig. 12: Relação de esforços (M_F e M_T) para dois tipos de vigas (com e sem rigidez à torção) em função do ângulo ϕ da viga principal com a viga estribo [3]

Neste sentido, conhecendo a influência da fissuração do betão na rigidez e comportamento deste tipo de estruturas, foi levada a cabo uma análise de sensibilidade fazendo variar tanto a rigidez à torção como à flexão da viga principal; tendo-se finalmente dimensionado as chapas desta zona e os aparelhos de apoio para os casos peggimos obtidos.



a) M_F e M_T – viga principal com K_T normal

b) M_F e M_T – viga principal com K_T reduzido

Fig. 13: Variação de esforços M_F e M_T em função da rigidez à torção K_T para o caso do viaduto de acesso do lado da Pilha Pulmão

2.3.3 Consolas de apoio dos viadutos de acesso

Perante a vontade demonstrada pelo Dono de Obra de se minimizar ao máximo o impacto ambiental e paisagístico da obra, optou-se por reduzir o mais possível o número de pilares. Neste sentido, decidiu-se apoiar os viadutos de acesso directamente no viaduto principal por meio de consolas metálicas previamente fixas às almas pré-esforçadas do viaduto, conforme se pode observar na “Fig. 14”.

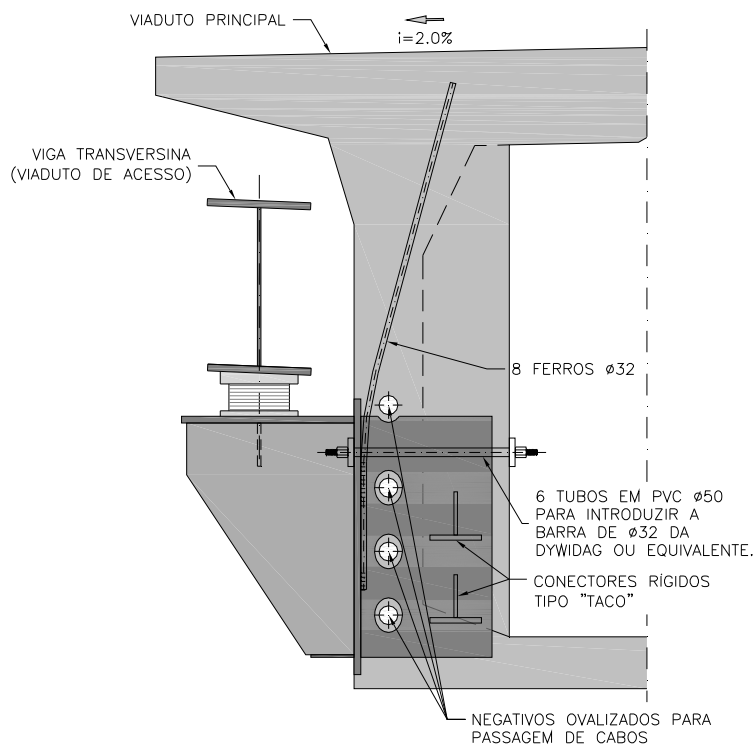
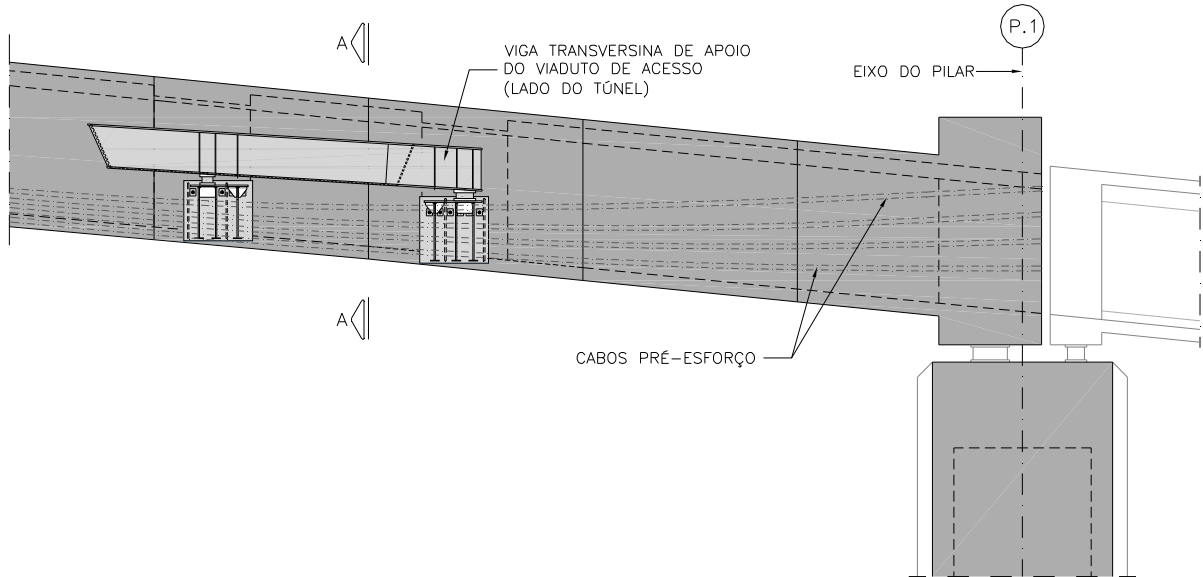
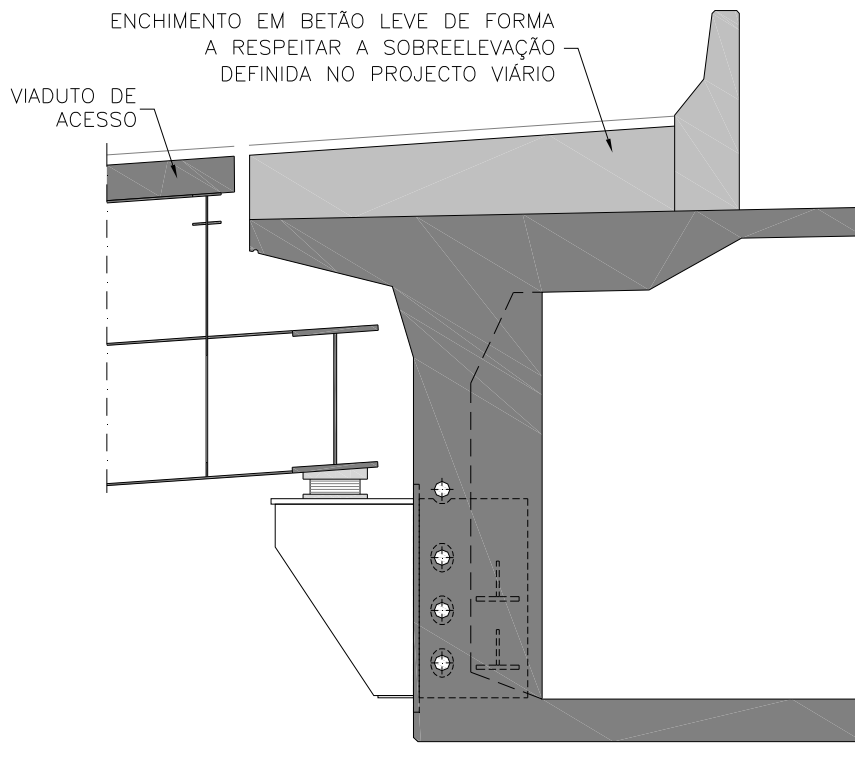


Fig. 14: Consolas metálicas de apoio dos viadutos de acesso

Além das vantagens estéticas inquestionáveis, esta solução, ao não contemplar o apoio dos viadutos de acesso em pilares, representa uma economia importante para o Dono de Obra e melhora significativamente as condições de conforto da circulação rodoviária, evitando assim deslocamentos relativos entre os dois viadutos na zona da junta de dilatação.



a) Vista da zona de apoio do viaduto de acesso do lado do Túnel no viaduto principal



b) Corte A-A

Fig. 15: Solução projectada para o apoio do viaduto de acesso no viaduto principal

3. Considerações Finais

A solução adoptada para o projecto de uma ligação, através de um viaduto, entre a planta de beneficiamento e tratamento de minério e a área de britagem primária e secundária, foi ao encontro das exigências e expectativas da mineradora VALE relativamente ao enquadramento paisagístico, estético e económico.

A opção de apoiar os viadutos de acesso directamente nas almas do viaduto principal, dispensando-se a construção de dois pilares suplementares, teve grande acolhimento por parte do Dono de Obra, principalmente pela redução significativa do impacto ambiental e dos custos de construção associados.

Referências

- [1] Wikipédia.
- [2] Javier Pascual Santos, “Criterios de dimensionamiento de los diafragmas interiores en secciones cajón de puentes mixtos”; Tesis Doctoral; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid 2004.
- [3] J. Manterola Armisen, C. Siegrist Fernández, M. A. Gil Ginés, “Puentes. Apuntes para su Diseño, Calculo y Construcción”; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid 2006.