



III CONGRESSO LUSO-AFRICANO DE
Construção Metálica
Sustentável

VIADUTO MISTO DE SIGÜES CONCEPÇÃO, DIMENSIONAMENTO E PROCESSO CONSTRUTIVO

Francisco Millanes Mato 1^a, Luis Matute 2^a, Miguel Ortega Cornejo 3^a, Helder Figueiredo 4^a,
João Adão da Fonseca 5

^a IDEAM S. A.

Resumo. O viaduto de Sigües localiza-se em Espanha na região autónoma de Navarra na auto-estrada A-21 entre Pamplona e Jaca. O viaduto consiste num tabuleiro contínuo com 25,30 m de largura e um comprimento total de 989,00 m desenvolvendo-se ao longo de uma curva de raio constante de 1.500,00 m com uma inclinação transversal de 4,775 % e sem juntas de dilatação. Estruturalmente, o viaduto é formado por uma viga mista contínua a trabalhar em dupla acção mista com a seguinte distribuição de vãos: 64,50 m + 10x86,00 m + 64,50 m.

1. Introdução

O vale do rio Escá é o acidente geográfico mais importante a ser atravessado pela auto-estrada A-21 entre Pamplona e Jaca, actualmente em construção. Devido ao aumento da capacidade da barragem de Yesa, este bonito vale ficará totalmente inundado prevendo-se o aproveitamento da albufeira nessa zona para o desenvolvimento de inúmeras actividades turísticas. Nesse sentido, foi um imperativo que o atravessamento do vale fosse realizado através de um viaduto que esteticamente respeitasse a paisagem e que até pudesse constituir ele próprio uma mais-valia no cenário paisagístico.



Fig. 1: Vale do rio Escá que ficará inundado futuramente (fotografia captada em Maio deste ano). Assim, perante um traçado praticamente plano ao longo de uma curva de raio constante de 1.500,00 m, e face à necessidade de um tabuleiro excepcionalmente largo de 25,30 m que albergasse 2 faixas de rodagem em cada sentido mais bermas interiores e exteriores nos dois sentidos, optou-se por um tabuleiro único em caixão trabalhando em dupla acção mista com a seguinte distribuição de vãos: 64,50 m + 10x86,00 m + 64,50 m

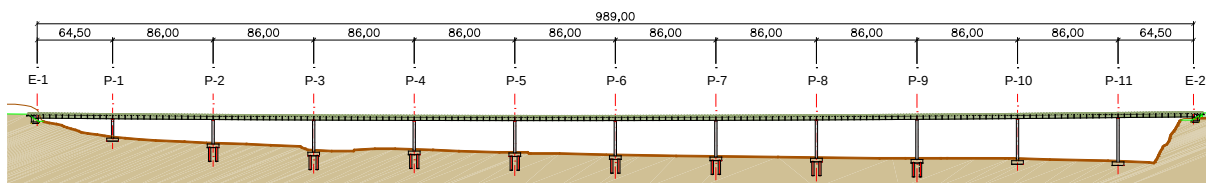


Fig. 2: Alçado do viaduto

1.1 Enquadramento

O projecto de concepção e dimensionamento deste viaduto surgiu de um pedido da construtora Isolux Corsán para estudar uma solução variante ao projecto original que considerasse um processo construtivo alternativo mais adequado às condições de construção que realmente existiam e que, por melhorias na concepção e por refinamento do cálculo, resultasse em vantagens económicas no que diz respeito às quantidades de materiais previstas e aos prazos de construção.

2. Descrição da Estrutura

2.1 Tabuleiro – aspectos geométricos e particularidades de concepção

Conceptualmente, todo o detalhamento e pormenorização da estrutura metálica teve por base a já larguíssima experiência da IDEAM na concepção, detalhe e dimensionamento de pontes mistas rodoviárias e ferroviárias [1], como, por exemplo, os viadutos mistos PS-07 e PS-08 na circular de Málaga [2] ou o viaduto sobre o Rio Nalón [3].

Conforme se descreveu anteriormente, o viaduto de Sigües desenvolve-se ao longo de uma curva constante de raio de 1.500,00 m e foi projectado como uma única viga contínua de 12 vãos formada por 2 vãos extremos de compensação de 64,50 m e 10 vãos centrais de 86,00, o que perfaz um comprimento total de viaduto de 989,00 m sem juntas de dilatação.

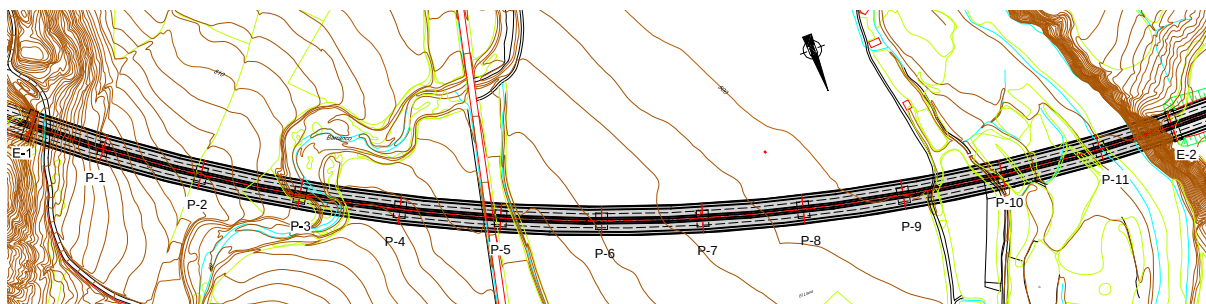


Fig. 3: Planta do viaduto

O tabuleiro é misto, composto por um caixão metálico aberto de 3,00 m de altura constante com 7,00 m da largura na base (banzo inferior) e 8,50 m de afastamento entre banzos

superiores. Transversalmente ao caixão metálico, para ambos os lados, unem-se a cada 5,375 m um par de escoras metálicas que aumentam a largura deste em 7,90 m para cada lado, garantindo assim uma largura efectiva total de 24,30 m, materializando-se apoios contínuos transversais cada 5,375 m que permitem o funcionamento longitudinal da laje em toda a largura do tabuleiro.

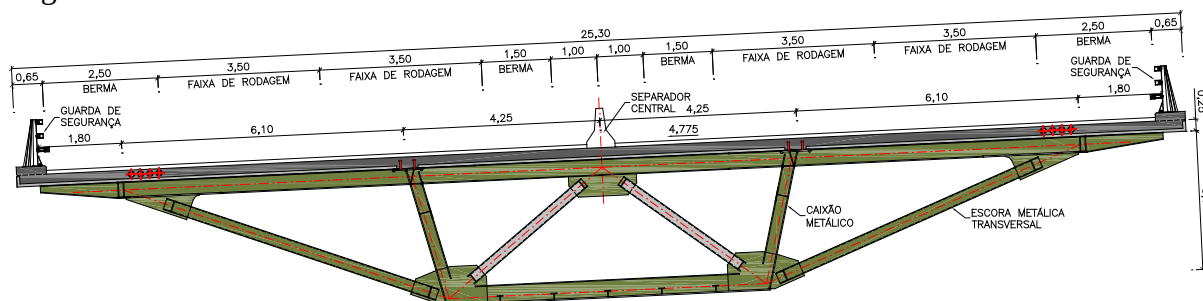


Fig. 4: Secção transversal a meio vão

Coincidente com o alinhamento das escoras transversais, foram dispostas treliças de rigidez vertical tipo “K” que garantem por um lado a não distorção do tabuleiro, e por outro lado o equilíbrio das forças pontuais descarregadas por cada uma das escoras.

Estas treliças, além de respeitarem as condições mínimas geométricas recomendadas pela regulamentação actual, foram dimensionadas de forma económica considerando apenas as condições de resistência. Actualmente, e de acordo com [4] J. Pascual Santos (2004), 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 quando atendidas certas condições geométricas. Efectivamente, estudos recentes demonstram que em caixões metálicos ou mistos dotados de treliças de rigidez transversais dimensionadas por condições de resistência que respeitem certas condições geométricas, a sobretensão longitudinal provocada por distorção (à passagem do veículo tipo normalmente definido pelas normas) não supera os 25 MPa, correspondendo a uma sobretensão bem inferior ao limite dos 10% de σ_s estabelecido pela grande maioria das normas internacionais de referência.

Adoptando as considerações anteriores, obteve-se um dimensionamento significativamente mais económico destes elementos. Reduzindo-se também a complexidade dos detalhes de ligação entre os elementos constituintes das treliças de rigidez e as chapas longitudinais.

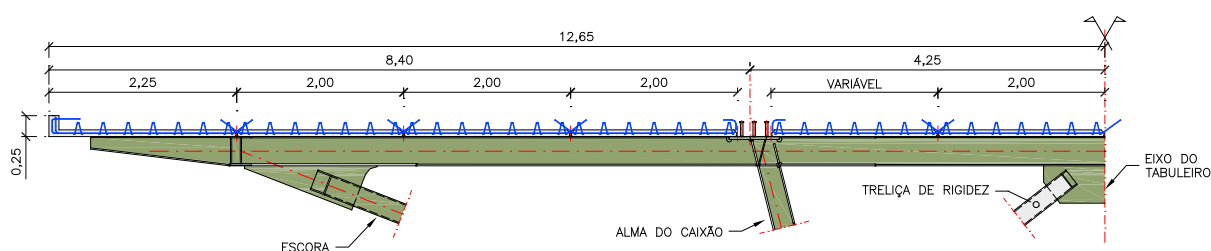


Fig. 5: Vista superior do caixão metálico em fase construtiva

Com a mesma cadência da treliça vertical transversal ao tabuleiro (cada 5,375 m), colocou-se uma treliça horizontal ao nível do bazo superior de modo a “fechar” provisoriamente o circuito de torção do caixão até que se betone a laje superior. Desta forma, durante a fase construtiva, garante-se o equilíbrio ao momento torsor devido à curvatura em planta do próprio viaduto de modo eficaz e simples.

Transversalmente à direcção longitudinal do caixão a corda superior das treliças verticais foi conectada à laje superior através de conectores de 19,00 mm de diâmetro de modo a permitir o funcionamento misto também deste elemento.

Sobre esta estrutura metálica (caixão + treliças transversais) apoia-se a laje em betão armado, que será construída por meio de pré-lajes treliçadas e pré-fabricadas de 0,08 m de espessura sobre as quais se derramará betão fresco “in situ” até se completar a espessura total da laje de 0,25 m. Com a laje de betão com 0,25 m de espessura obtém-se uma altura total de 3,25 m, o que corresponde a uma esbelteza constante de 1/26.

**Fig. 6:** Apoio da pré-laje pré-fabricada ao longo das treliças transversais

Sobre os pilares, de modo a conseguir que o tabuleiro trabalhe com dupla acção mista aço-betão, betonou-se a laje de fundo até $\frac{1}{4}$ do vão aproximadamente, com uma espessura a variar entre os 0,25 m e os 0,70 m sobre o pilar.

A utilização de dupla acção mista em zona de momentos negativos, além de garantir uma maior ductilidade da secção sobre os pilares (por rebaixamento do eixo neutro), permite ainda melhorar a classe da secção, possibilitando o cálculo plástico à flexão em ELU, reduzindo-se a quantidade de aço necessária. No mesmo sentido, o betão de fundo, através de conectores soldados ao banzo inferior, garante a estabilização da chapa de fundo do caixão face a momentos negativos sobre os pilares, minorando ao máximo a quantidade de nervuras longitudinais necessárias.

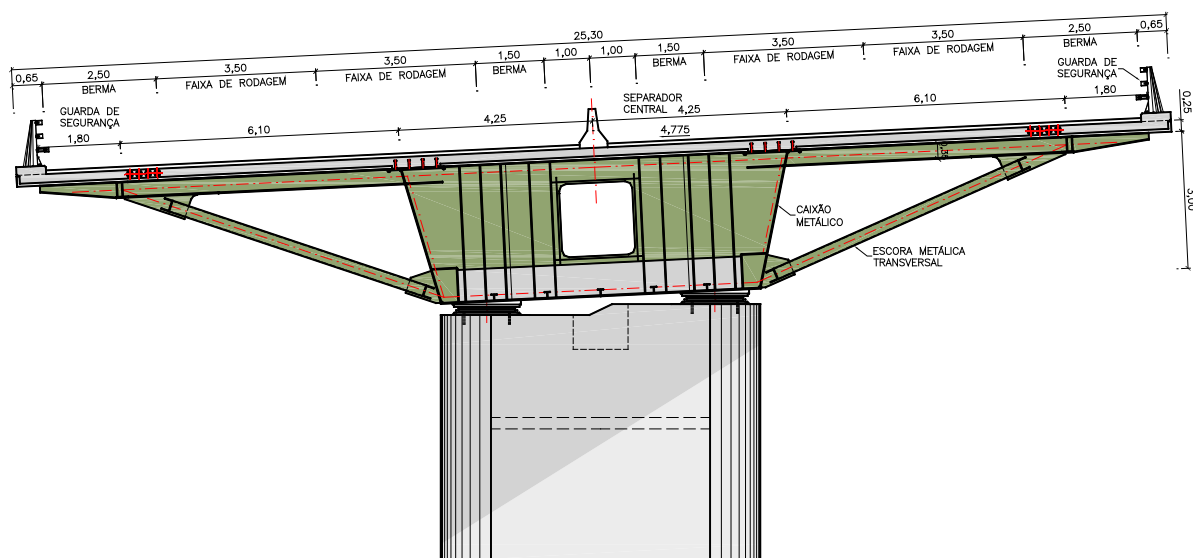


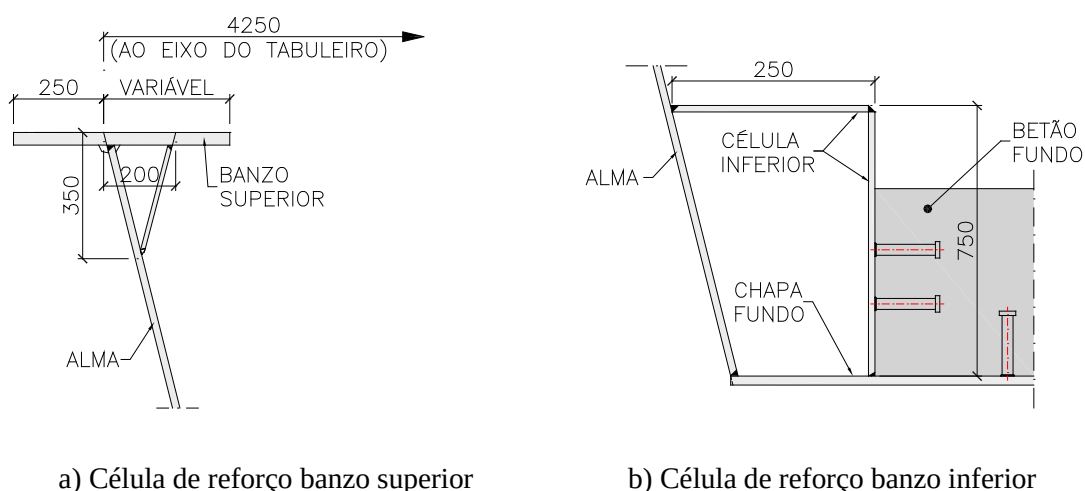
Fig. 7: Secção transversal sobre pilares

A laje de fundo de compressão foi, conforme se disse no paragrafo anterior, prolongada até cerca de $\frac{1}{4}$ do vão para ambos os lado dos pilares – que é a zona a partir da qual a envolvente péssima de momentos negativos deixa de exigir uma estabilização significativa da chapa de fundo com nervuras.

Apesar da utilização de dupla acção mista em zona de momentos negativos, os elevados esforços a absorver exigiam espessuras de chapas especialmente elevadas no caso da utilização de aço da classe S355. Assim, nas regiões mais esforçadas do diagrama de momentos, utilizaram-se chapas da classe S460 de forma a evitar detalhes de soldadura extremamente complexos em chapas muito traccionadas e de elevada espessura.

**Fig. 8:** Aspecto do banzo inferior junto ao septo de apoio sobre os pilares

De modo a melhorar o comportamento do caixão metálico face a tensões normais no sentido longitudinal, recorreu-se em diferentes zonas do caixão a chapas longitudinais de reforço tanto junto ao banzo inferior como junto aos banzos superiores.

**Fig. 9:** Células de reforço longitudinal

Estas chapas de reforço, habitualmente chamadas de células, foram colocadas junto aos banzos superiores na zona de momentos positivos para ajudar à estabilidade das chapas das almas em serviço (fenómenos conhecido como “respiração de alma”) e por outro, para tornar os banzos superiores totalmente eficazes (baixando a classe dos mesmos) durante a fase construtiva, quando estes ainda não contam com o efeito estabilizador da laje superior através dos conectores. Junto ao banzo inferior, as células de reforço foram dispostas na zona de momentos negativos de forma a diminuir a esbelteza das almas na zona de maiores tensões tangenciais por torção e esforço transversal.

No que diz respeito ao enrijecimento do caixão metálico, foram dispostas nervuras verticais entre as treliças principais transversais – reduzindo assim a dimensão dos painéis das almas na direcção longitudinal para 5,375/2. Na continuidade destas nervuras, foram dispostas nervuras horizontais de enrijecimento do banzo inferior do caixão.

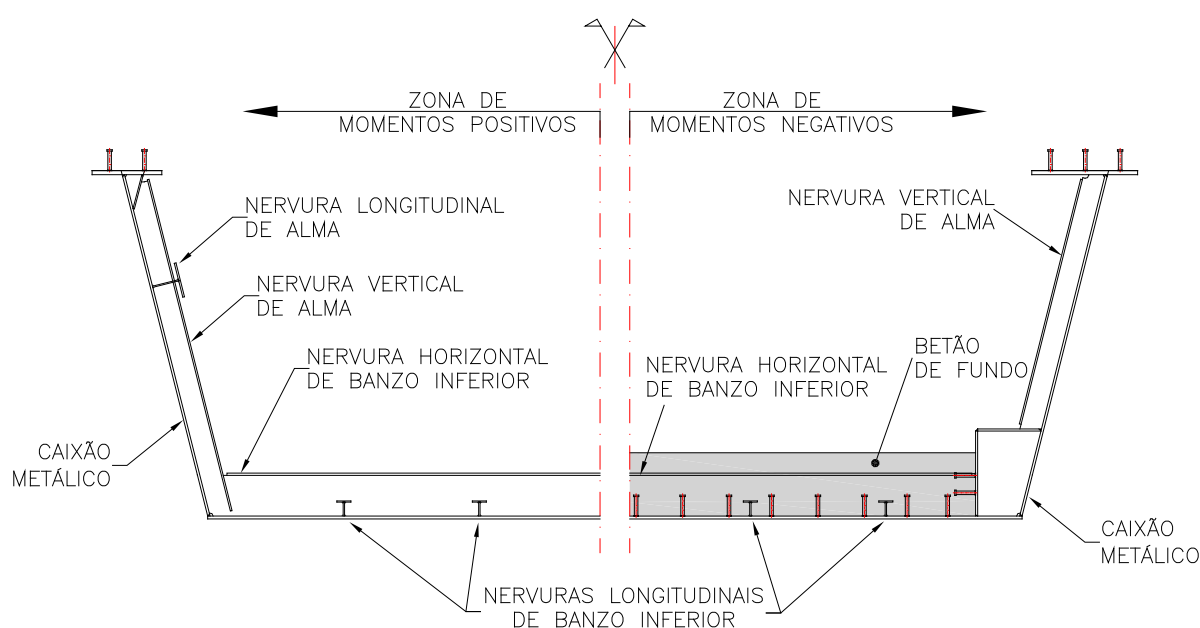


Fig. 10: Distribuição de nervuras adoptada

No cálculo global dos esforços, nomeadamente no que diz respeito à modelização do comportamento global do viaduto foi considerada, em zona de momentos negativos, a contribuição do betão traccionado entre fendas da laje superior, fenómeno esse vulgarmente conhecido como “tension-stiffening”. A consideração do fenómeno de “tension-stiffening” na rigidez das secções de momentos negativos constitui um refinamento importante do modelo, permitindo uma aproximação muito mais próxima àquela que será a distribuição real de esforços ao longo do tabuleiro, conduzindo por isso a um dimensionamento mais apurado, real e económico.

Relativamente à ligação do tabuleiro aos pilares e encontros, optou-se por aparelhos de apoio tipo POT. Longitudinalmente o tabuleiro é agarrado apenas nos pilares P5, P6 e P7. Transversalmente, o apoio do tabuleiro é materializado em todos os eixos de apoio com um POT totalmente deslizante nas duas direcções e outro guiado na direcção longitudinal.

2.2 Pilares, encontros e fundações

Os pilares são construídos em betão armado e, de forma a criar o menor impacto paisagístico possível, são de fuste único, e a sua altura varia entre os 17,00 m (P1) e os 40,00 m (P11). Conforme a “Fig. 11”, pelo facto de virem a ficar quase totalmente submergidos, optou-se por uma secção maciça que reduzisse ao mínimo os riscos de problemas de corrosão ou sujidade no interior dos mesmos.

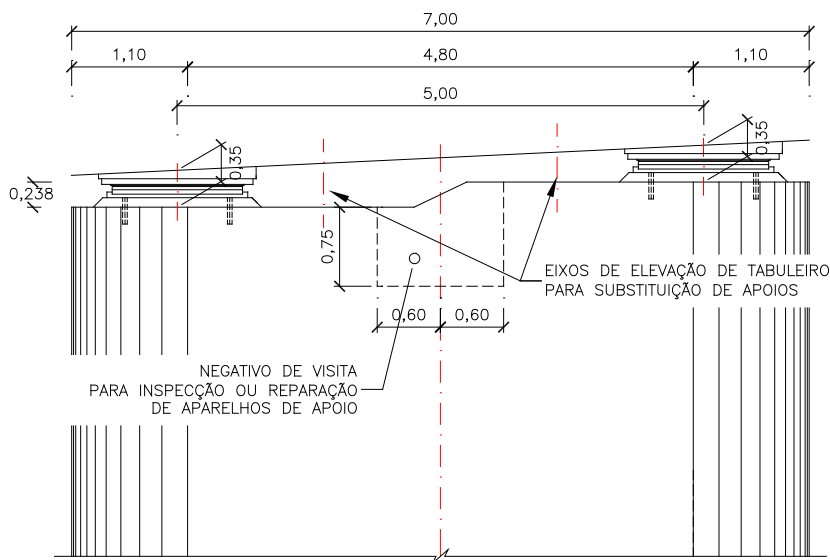


Fig. 11: Alçado da secção típica dos pilares

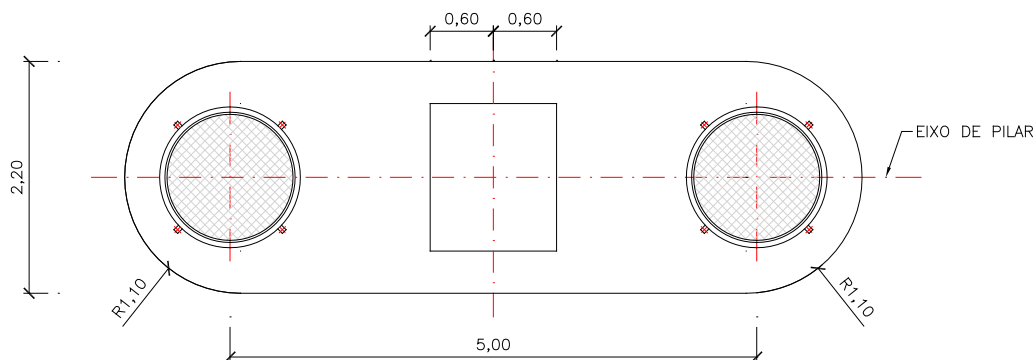


Fig. 12: Planta da secção típica dos pilares

No que diz respeito às fundações dos pilares: as fundações são directas por sapata no caso dos pilares P1, P10 e P11, e profundas por estacas de 1800 mm de diâmetro nos restantes casos.

Os encontros do “tipo cofre” são em betão armado e, à semelhança dos pilares P1, P10 e P11, também são fundados no terreno por meio de sapatas.

3. Processo Construtivo

Tendo em conta que as obras de aumento da capacidade da barragem Yesa estão ainda a decorrer, e considerando a altura relativamente acessível dos pilares (entre os 17,00 m e os 40,00 m), optou-se pela montagem do caixão “in situ” através de autogruas.

Dadas as grandes dimensões do caixão, dividiu-se os vãos em 3 partes (26,875 m + 32,250 m + 26,875 m) de forma a permitir a elevação de tramos pré-fabricados com recurso a

autogrúas convencionais. Estes tramos pré-fabricados ficam apoiados sobre pilares provisórios, onde posteriormente se faz a soldadura definitiva de ligação entre eles.

Após realizada a soldadura definitiva de ligação entre tramos do caixão metálico, retiram-se os apoios provisórios dos primeiros vãos e, com a viga a trabalhar em continuidade, betona-se a laje de fundo do caixão dos primeiros pilares.

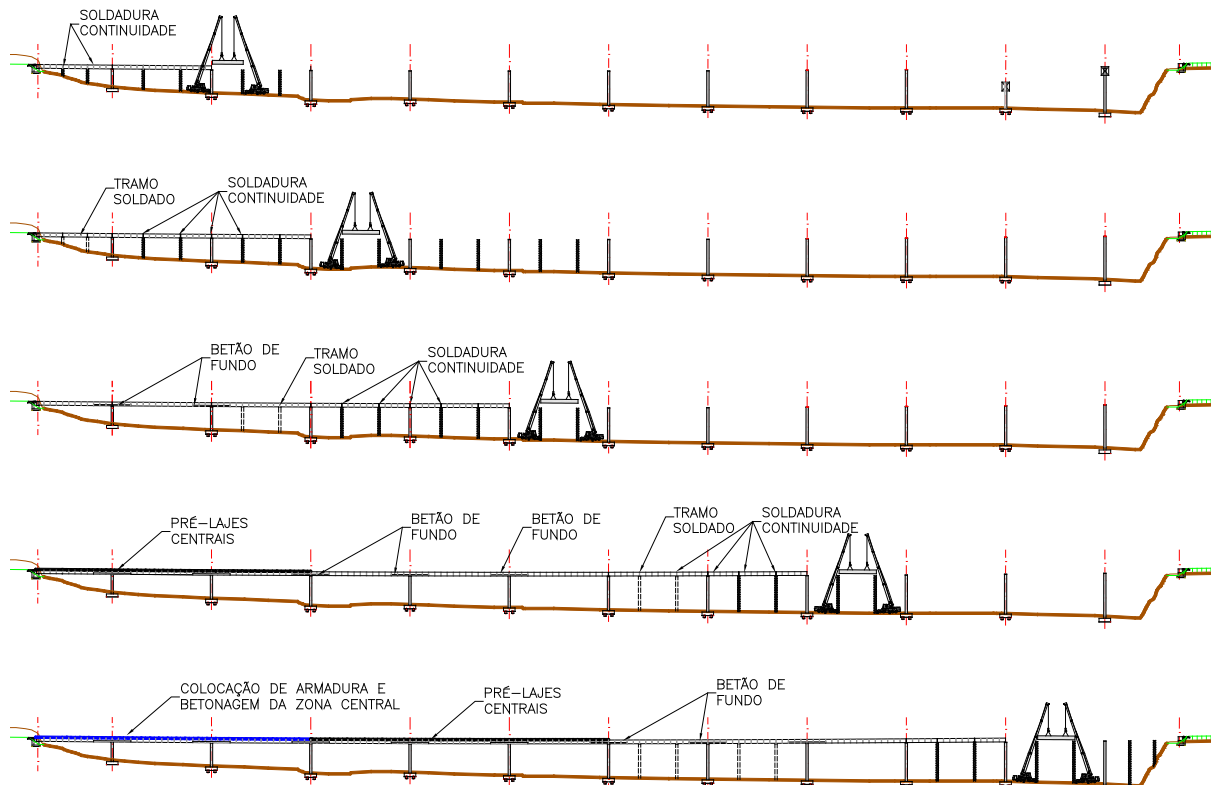


Fig. 13: Sequência da 1ª fase do processo construtivo



Fig. 14: Içamento de um dos tramos

Depois de betonada a laje de fundo, são içadas as pré-lajes centrais. A betonagem da laje é feita em duas fases de forma a reduzir o acumulado de tensões na secção metálica: em primeiro lugar betona-se a zona central e, posteriormente, após endurecimento da zona central, betonam-se as bandas exteriores tirando partido do funcionamento misto do caixão.

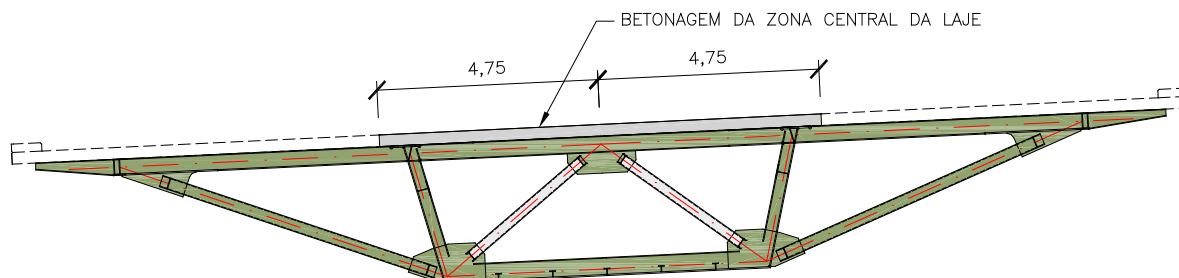


Fig. 15: Fase 1 de betonagem

Por fim, depois de betonada a laje na sua totalidade, coloca-se a camada de betuminoso, as guardas de segurança, as barreiras, etc.



Fig. 16: Aspecto da obra (foto captada em Setembro deste ano)

4. Conclusões

Com o projecto variante desenvolvido, conseguiu-se melhorias significativas nos prazos de execução da estrutura e poupanças muito relevantes no preço global da obra. A adaptação do processo construtivo às condições de construção que realmente existem, uma concepção mais adequada e o refinamento do processo de cálculo, conduziram a poupanças importantes, tendo-se obtido as quantidades que se resumem nas tabelas seguintes:

Tabela 1: Resumo quantidades – Encontros

Fundações [kg/m ³]	Parte Elevada [kg/m ³]
95	60

Tabela 2: Resumo quantidades – Pilares

Sapatas/Maciço encabeçamento de Estacas	Estacas	Fustes
---	---------	--------

[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
95	50	90

Tabela 3: Resumo quantidades – Tabuleiro

*Aço Estrutural [kg/m ²]	Armadura Passiva [kg/m ²]
200	80

Nota: S355 para a generalidade das chapas e S460 para as chapas de banzo superior e inferior em zona de momentos negativos e diafragmas de apoio em pilares.

5. Principais intervenientes

Destaca-se os principais intervenientes desta obra:

Dono de Obra: Ministerio de Fomento de España

Empresa Construtora: Isolux Corsán-Corviam

Projecto da estrutura: IDEAM S.A. (Luis Matute, João Adão da Fonseca e Helder Figueiredo)

Assistência Técnica à obra durante fase construtiva: IDEAM S.A. (Miguel Ortega, Juan Luis Mansilla e Jesús Martín)

Referências

- [1] Millanes F, Matute L, Ortega Cornejo M, Agromayor D, Bordó Bujalance E. “Desarrollo de soluciones mixtas y metálicas para viaductos de las líneas de alta velocidad españolas”. Hormigón y Acero Volumen 62, nº 259, 7-27. Janeiro-Março 2011
- [2] Millanes F, Matute L, Agromayor D, Nebreda Sánchez J. “Viaductos mixtos PS-07 y PS-08 en la hiper-ronda Oeste de circunvalación de Málaga”. ACHE. Barcelona Outubro 2011
- [3] Millanes F, Ortega Cornejo M, Pascual Santos J. “El viaducto sobre el Río Nalón, un puente mixto de carretera con un vano principal de 110 m de luz”. Hormigón y Acero Volumen 60, nº 254, 29-42. Outubro-Dezembro 2009
- [4] Pascual Santos J, “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