



UM NOVO CONCEITO DE CIMBRE SUPERIOR PARA CONSTRUÇÃO DE TABULEIROS DE PONTES TRAMO A TRAMO

Pedro Pacheco^a, António Adão da Fonseca^b, Hugo Coelho^c e Sousa Lima^d

^{a,b} *CEO BERD e Prof. Aux. da FEUP, Director de Projectos BERD*

^{c,d} *Investigador e Projectista BERD, Director Técnico Comercial da Doka Portugal*

Resumo. Ao longo da última década têm sido desenvolvidos vários trabalhos de investigação, desenvolvimento e aplicação na área do pré-esforço orgânico. Esta nova tecnologia está agora a ser aplicada a uma nova geração de cimbres auto-lançáveis.

Este artigo refere-se a um cimbra superior cuja estrutura consiste essencialmente num arco metálico com uma corda inferior controlada activamente por um sistema de pré-esforço orgânico (OPS). No fundo, trata-se de uma estrutura metálica do tipo “bowstring” na qual o tirante é activo, fazendo uso da tecnologia OPS.

1 Introdução

As vantagens da aplicação de pré-esforço orgânico em estruturas com elevadas razões entre cargas variáveis e cargas permanentes, como é o caso dos cimbres auto-lançáveis usados na construção de tabuleiros de pontes [1], tem promovido um crescente desenvolvimento desta área tecnológica nos últimos anos.

A aplicação desta nova tecnologia permite a concepção de estruturas substancialmente mais leves e funcionais - a maximização do seu potencial, cujo limite ainda se não conhece, justifica a concepção de novas tipologias de estruturas metálicas, congregando vantagens estruturais e respostas a necessidades funcionais, nomeadamente de cinemática, que são marcantes neste tipo de equipamento.

O presente artigo descreve um equipamento do tipo cimbra superior cuja estrutura em aço se caracteriza por ter uma corda superior em arco e uma corda inferior controlada activamente por um sistema de pré-esforço orgânico. Trata-se, no fundo, de uma estrutura metálica do tipo “bowstring” na qual o tirante é activo. O desenvolvimento deste equipamento enquadra-se num trabalho mais vasto de génese de uma nova geração de cimbres auto-lançáveis.

Após uma descrição geral do cimbra, são apresentados os aspectos fundamentais da viga superior, das estruturas transversais e da cofragem. Posteriormente é descrito o ciclo tipo, com particular enfoque no processo de avanço. Finalmente são apresentadas as conclusões, nas quais se destacam a considerável redução de peso da solução apresentada quando comparada com equipamentos correntes semelhantes, mas acima de tudo a significativa redução de deformações da estrutura durante a fase de betonagem.

2 A viga superior

O M50-S, apresentado na Fig. 1, é um cembre auto-lançável superior concebido para a realização de tabuleiros de pontes com vãos máximos de 50 m. A viga superior caracteriza-se por ter uma corda superior em arco e uma corda inferior controlada activamente na fase de betonagem por um sistema de pré-esforço orgânico (OPS). É uma solução estrutural tipo “bowstring” na qual o tirante é activo, sendo progressivamente tensionado à medida que a estrutura é carregada com o peso do tabuleiro. Na fase de avanço, o tirante é “desligado” e a estrutura comporta-se como uma treliça metálica de altura variável.

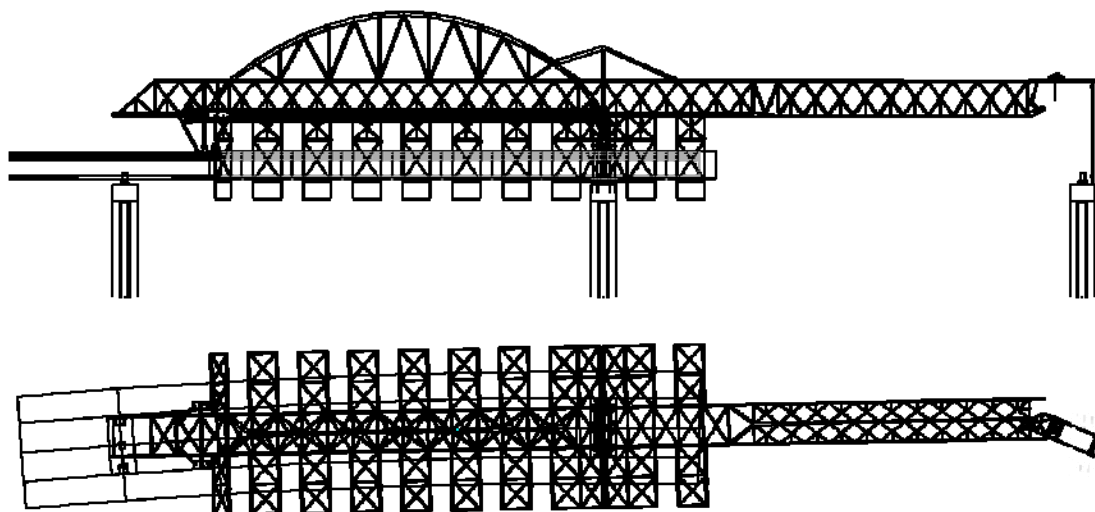


Fig. 1: Cembre M50-S: alçado (cima) e planta (baixo)

2.1 Estrutura Metálica

A estrutura metálica da viga superior do M50-S, cujo modelo de cálculo se representa na Fig. 2, é constituída pelos seguintes elementos fundamentais: arco, viga principal, tirante superior, nariz, lança traseira e lança dianteira.

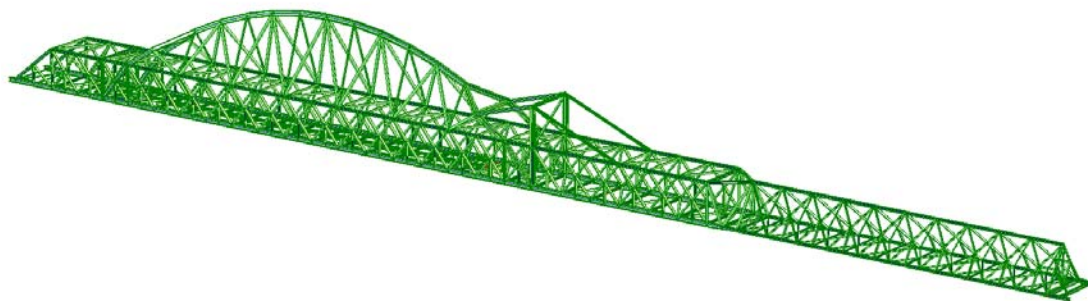


Fig. 2: Modelo de cálculo da viga superior

O arco metálico, com uma altura máxima de 9 m e uma distância máxima entre apoios na betonagem de 40 m (relação corda/flecha $\approx 4,4$), é constituído por um perfil único (HEB 400) que se abre em dois HEB 300 nos arranques, aumentando a sua estabilidade.

A viga principal é um caixão metálico treliçado, com uma secção de 4 m de largura por 3 m de altura, cuja principal função é dar apoio às estruturas transversais de suporte da cofragem. A viga principal tem um comprimento total de 60 m, 15 dos quais constituem a consola dianteira, 40 estão suspensos no arco e os restantes 5 constituem uma consola traseira extraordinariamente curta.

As cordas inferiores da viga principal, constituídas por perfis HEB 340, são activamente controladas por um sistema OPS entre os encontros do arco, que impede o afastamento dos mesmos e a consequente abertura do arco. Esta particularidade confere à estrutura um funcionamento do tipo “bowstring” na fase de betonagem.

A eficiência estrutural do arco e do tirante activo durante a betonagem permite reduzir drasticamente as deformações da viga principal entre os apoios. No entanto, a zona de betonagem em consola (1/5 do vão seguinte) não dispõe de pré-esforço orgânico. Esta opção justifica-se pelo facto de significar uma considerável simplicidade no que diz respeito a aspectos como o traçado de pré-esforço e a estratégia de controlo. Desta forma, o problema da deformação da consola de betonagem é contornado mediante a inclusão de dois tirantes superiores passivos com uma excentricidade máxima de 6 m em relação à corda inferior da viga principal na secção do apoio no pilar, que resultam num aumento considerável da rigidez.

A função do nariz, da lança dianteira e da lança traseira é a de viabilizar o avanço do cimbre. O nariz tem um comprimento de 27,5 m e uma secção transversal triangular, com 4 m de largura por 3 m de altura. A lança traseira consiste num prolongamento da viga constituído por duas treliças verticais com capacidade de abertura (rotação independente em torno de um eixo vertical), o que permite realizar a desmontagem do pórtico de pilar traseiro com o cimbre na posição de betonagem. Por outro lado, a lança dianteira consiste num prolongamento do nariz, com capacidade de rotação em torno de um eixo vertical e equipado com um pórtico provisório e um guincho de elevação. Ainda em posição de betonagem, o pórtico provisório “aterra” no pilar da frente (através de hidráulicos) permitindo à lança dianteira elevar, a partir do solo, e montar o pórtico de pilar previamente desmontado.

2.2 Sistema OPS

O sistema OPS é uma forma de pré-esforço adaptativa, em que as forças aplicadas são automaticamente adaptadas às cargas actuantes por um sistema de controlo, de forma a reduzir deformações e minimizar tensões. Os elementos fundamentais (ver Fig. 3) são: o actuador na ancoragem orgânica, os cabos não aderentes, os sensores e o controlador [2,3,4,5].

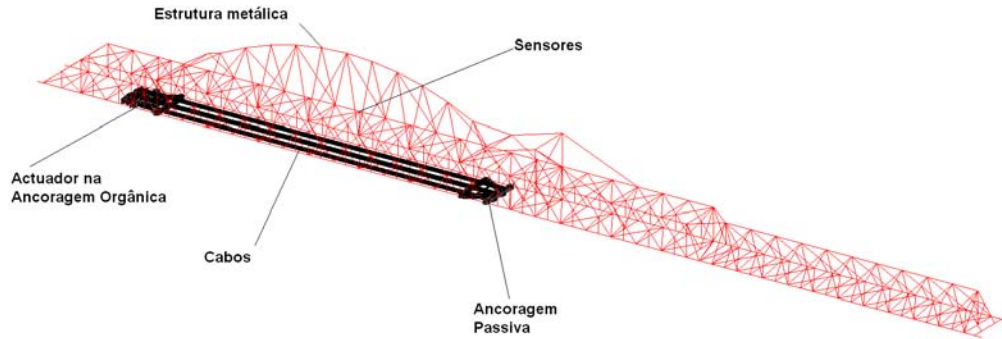


Fig. 3: Esquema 3D da viga de um cembre superior OPS

A estratégia de controlo é semelhante à utilizada nas primeiras aplicações do sistema OPS, adoptando a flecha a meio vão como principal variável de controlo. A medição da flecha é efectuada através de sensores (transdutores de pressão) colocados em pontos estratégicos da estrutura. A informação recolhida é transmitida ao autómato e processada de acordo com o algoritmo de controlo que “decide” entre manter ou variar a intensidade do pré-esforço [1]. Tipicamente, numa situação de betonagem, caso a flecha seja superior ao limite pré-estabelecido, a decisão do autómato traduz-se na realização de cursos elementares do êmbolo do cilindro hidráulico (actuador) que afasta a viga de ancoragem orgânica tensionando simultaneamente os quatro cabos de pré-esforço (ver Fig. 4).

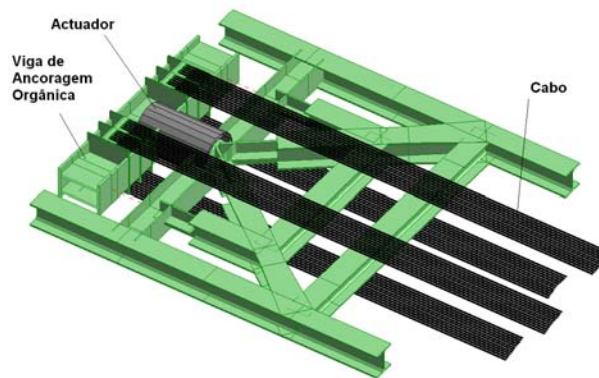


Fig. 4: Modelo de cálculo da Ancoragem Orgânica

O traçado dos cabos é rectilíneo horizontal e cada cabo é composto por um conjunto de 20 monocordões.

2.3 Efeito do OPS nas ligações

A necessidade de efectuar o transporte e, mais tarde, o armazenamento da estrutura metálica e as restrições que daí advêm obrigam à adopção de uma concepção modular para a estrutura. As ligações entre módulos são aparafusadas e são elementos de enorme sensibilidade neste tipo de estruturas metálicas.

O efeito estrutural do OPS faz-se sentir nas ligações. O OPS impede a abertura do arco, permitindo-lhe manter o seu comportamento estrutural natural, impedindo o aparecimento de momentos. Assim, durante a betonagem os esforços actuantes no arco são essencialmente de

compressão. Por outro lado, este “bowstring” activo absorve quase a totalidade da carga de betonagem, permitindo aliviar as cordas, diagonais e montantes da viga principal. Consequentemente, as ligações entre os elementos fundamentais, em particular entre os módulos do arco e da viga principal são essencialmente condicionadas pelos esforços actuantes na fase de avanço. Na Fig. 5, representam-se esquemas das ligações tipo entre as cordas do arco e entre as cordas inferiores da viga principal, que consistem em ligações de topo correntes - 4 M33 e chapa de 30 mm no caso da corda inferior da viga e 6 M36 e chapa de 35 mm no caso da corda do arco. Os parafusos são da classe 8.8. É notório, particularmente no caso da corda inferior, que o OPS é assegura ligações particularmente simples e seguras (por serem pré-esforçadas na fase de carregamento mais importante).

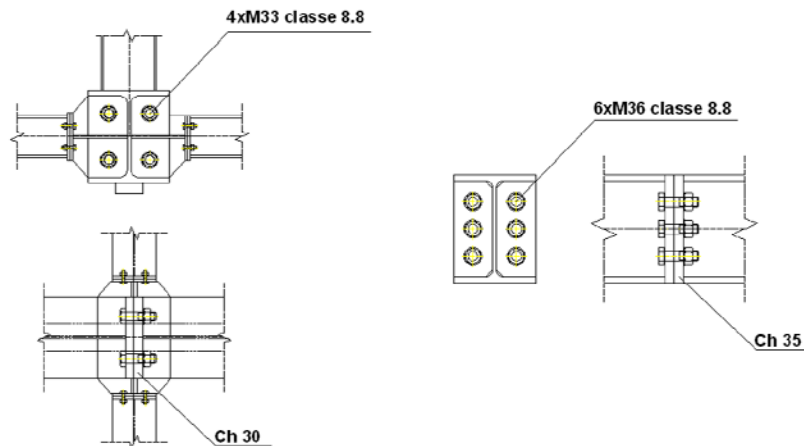


Fig. 5: Ligações de topo da corda inferior (esquerda) e da corda do arco (direita)

3 A estrutura transversal

Num cimbrio superior, o tabuleiro é construído por baixo da viga principal, pelo que a estrutura transversal que suporta a cofragem do tabuleiro está suspensa desta através de pares de “asas transversais” que garantem a largura necessária para a cofragem. A estrutura transversal é materializada por dois conjuntos de treliças metálicas, sendo cada conjunto constituído por uma treliça vertical e uma treliça horizontal.

Durante a betonagem, as treliças horizontais inferiores são interligadas de modo a posicionar a cofragem. O elevado valor das cargas aplicadas às estruturas transversais durante a betonagem e as exigências em termos de deformação implicam a colocação de um par de varões de pré-esforço roscados numa posição interior que suspendem a estrutura transversal reduzindo o vão (ver Fig. 6). Estes varões de pré-esforço são convenientemente posicionados de modo a não interferirem na colocação de armaduras pré-fabricadas do caixão.

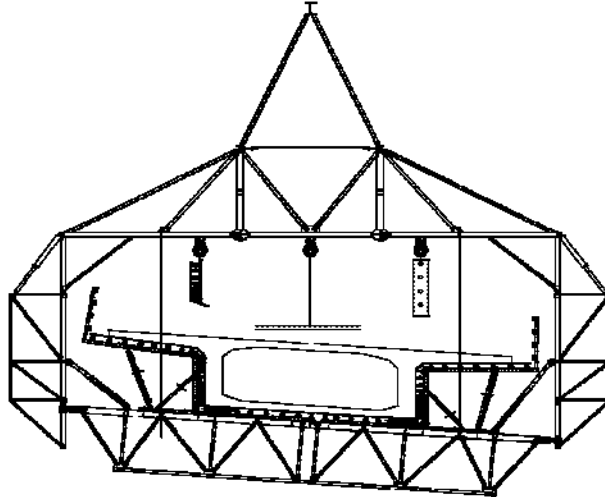


Fig. 6: Cimbre em posição de betonagem (corte transversal)

Antes do avanço do cimbre, as treliças horizontais inferiores são desligadas e retiram-se os varões de pré-esforço, procedendo-se à abertura das estruturas transversais para a posição de avanço. A abertura é efectuada por actuação em cilindros hidráulicos, que permitem a rotação automática de estruturas transversais e cofragem.

As estruturas transversais foram estudadas para a construção de tabuleiros de pontes e viadutos com inclinações longitudinais até 5% e inclinações transversais até 8%, sendo possível fazer variações da inclinação transversal, que tipicamente acontecem em tabuleiros de pontes em clotóide. Ao contrário dos cimbres tradicionais, em que o tabuleiro é construído em segmentos de recta entre pilares, esta estrutura transversal permite a construção em poligonais de 5 m, aproximando-se mais da forma da directriz (circular ou clotóide).

Nas “asas transversais” são colocados pares de guinchos (ver Fig. 6) que permitem transportar armaduras pré-fabricadas e bainhas de pré-esforço directamente do camião de transporte até à frente de obra, não havendo necessidade de equipamento de elevação auxiliar.

4 A cofragem

A cofragem dos cimbres auto-lançáveis para construção de pontes betonadas “in situ” é geralmente concebida para cada aplicação concreta. A cofragem da primeira aplicação do M50-S foi desenvolvida para um tabuleiro com secção transversal em caixão, com largura total de 11,50 m e altura constante de 2,40 m. O processo construtivo idealizado para o tabuleiro pressupõe duas fases de betonagem, betonando-se na primeira fase o fundo e as paredes laterais e na segunda fase a laje superior e as abas laterais, conforme se representa na Fig. 7.

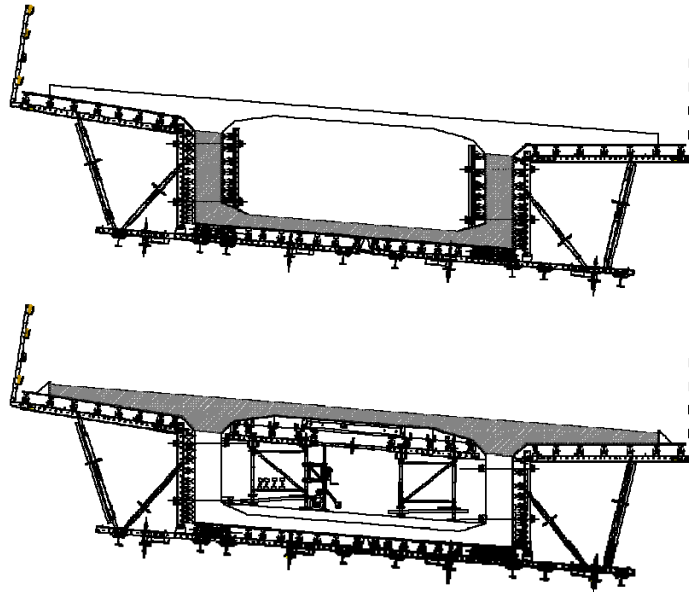


Fig. 7: Cofragem e faseamento da betonagem: 1ª fase (cima) e 2ª fase (baixo)

O desenvolvimento do estudo da cofragem teve em consideração vários aspectos peculiares relacionados com a concepção do cimbra. Assim, foram concebidas “mesas” de cofragem com 5,0 m de comprimento que se apoiam nas estruturas transversais com um afastamento de 2,80 m. Por outro lado, o fundo exterior da cofragem, é dividido em 2 partes simétricas, de forma a acompanhar o movimento de abertura das estruturas transversais. Os apoios materializam-se em 6 pontos de contacto vertical e 2 pontos de contacto horizontal (fundamentais durante a abertura) com cada estrutura transversal.

A cofragem foi desenvolvida visando a funcionalidade, realçando-se a ligação entre os taipais laterais exteriores e o fundo que possibilita ajustes na vertical e transversalmente, assim como a movimentação permitida pelas “mesas” de cofragem, de forma a possibilitar a execução da geometria do tabuleiro. A cofragem da laje superior é movimentada por mecanismos próprios para a posição de betonagem do tramo seguinte.

5 O avanço

Na operação de cimbres auto-lançáveis, é essencial que o avanço seja feito de uma forma segura, rápida e eficaz, de modo a evitar atrasos e acidentes na construção da ponte que geralmente implicam custos económicos e humanos muito elevados. O M50-S foi concebido para fazer ciclos de 1 semana, permitindo cumprir prazos de execução reduzidos, contribuindo para uma redução considerável no custo de construção da ponte.

Para obter ciclos curtos de trabalho é essencial realizar avanços rápidos, colocando a viga na posição de betonagem em poucas horas. Assim, o segundo pórtico de pilar é montado ainda durante a cura do betão, sendo içado a partir do solo por um guincho de elevação colocado na lança dianteira, ficando pronto para receber o nariz dianteiro da viga superior na fase de avanço. Esta operação é representada pela Fig. 8.

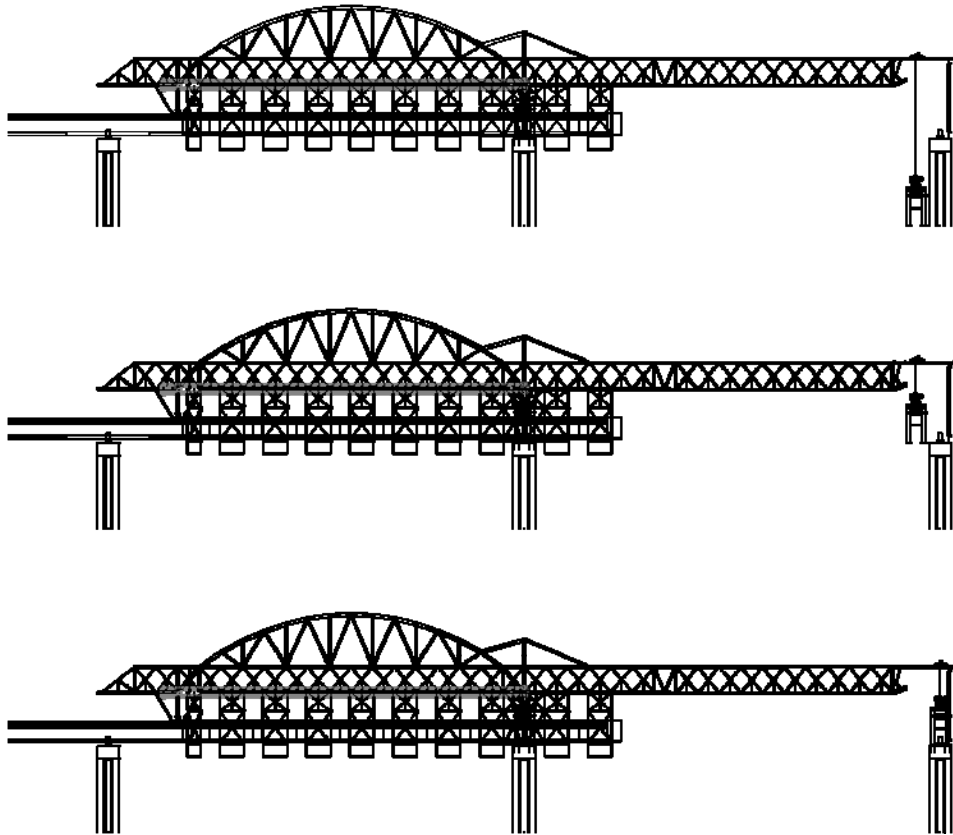


Fig. 8: Operação de montagem do 2º pórtico de pilar para o avanço

O cimbra M50-S caracteriza-se por ter uma consola traseira invulgarmente curta, pelo que, para avançar a viga, é necessário montar um pórtico de avanço que apoia directamente no tabuleiro já construído. A posição deste pórtico traseiro de avanço foi estudada de modo a que as acções provocadas no tabuleiro pelo peso viajante do cimbra não sejam superiores às que o tabuleiro irá experimentar após a entrada em funcionamento. Assim, após a cura do betão, dá-se o pré-esforço no tabuleiro com o OPS em modo automático de descarga. Em seguida, desliga-se o OPS e efectua-se a descida do cimbra (cerca de 15 cm) e descofragem do tabuleiro por actuação nos hidráulicos de apoio, ficando o cimbra apoiado em bogies situados no primeiro pórtico de pilar e no pórtico de avanço traseiro. Nesta altura procede-se à desmontagem por rotação do apoio traseiro de betonagem. Com o cimbra nesta posição, desmontam-se os varões de pré-esforço internos de apoio à cofragem e elimina-se ligação entre estruturas transversais, sendo então possível realizar a abertura (por rotação) das estruturas transversais por actuação em hidráulicos. Estas operações estão simplificada e esquematizadas na Fig. 9.

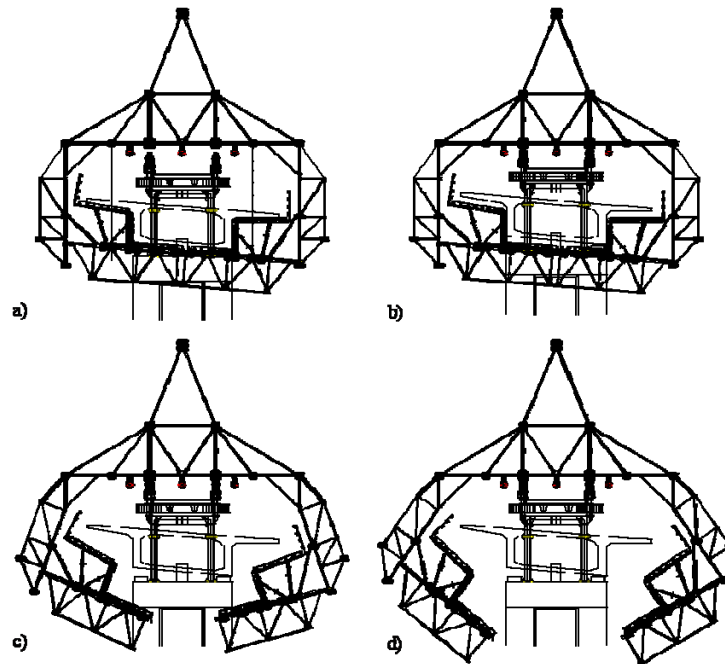


Fig. 9: Descida da viga, desmontagem de varões e abertura das estruturas transversais

No caso de a directriz da ponte ser em curva ou clotóide, é feita uma ripagem transversal de modo a alinhar a viga superior com o segundo pórtico de pilar antes de se iniciar a movimentação longitudinal do cimbra, procedendo-se em seguida ao avanço até ao segundo pórtico de pilar.

Naturalmente, devido a deformações pelo peso próprio, a ponta do nariz da viga chega ao segundo pórtico de pilar com uma cota inferior à do bogie, sendo necessário elevar o nariz para se continuar o avanço. Nos cimbres tradicionais, esta elevação é feita com um patim levantado na ponta que entra em contacto com a roda do bogie e eleva o nariz da viga à medida que vai sendo feito o avanço. No M50-S, a elevação é feita por hidráulicos que forçam a elevação do nariz da viga (reagindo contra o pórtico de pilar), voltando a pousar a viga nas rodas do bogie, com o cimbra immobilizado (ver Fig. 10). Esta operação permite um maior controlo da posição da viga, possibilitando reduzir as incertezas associadas à operação de apoio no segundo pórtico de pilar.

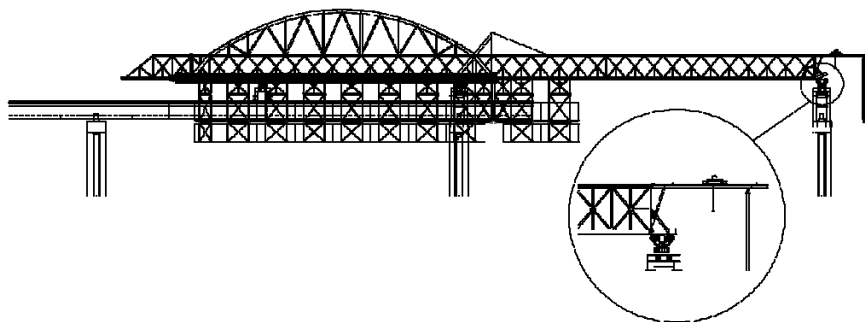


Fig. 10: Elevação do nariz para apoio no segundo pórtico de pilar

Após apoiar no segundo pórtico de pilar, o cimbra avança em 3 apoios até perder o apoio no pórtico traseiro de avanço, continuando então a avançar apoiado nos dois pórticos de pilar

até chegar à sua posição final. Esta sequência de avanço está representada na Fig. 11. Procede-se então a uma segunda ripagem transversal de modo a colocar a viga na posição exacta de betonagem. Em seguida, é montado o apoio traseiro de betonagem na consola do tabuleiro (de modo a reduzir o vão do cimbre para a betonagem), a viga é elevada para a cota de betonagem e são fechadas e unidas as estruturas transversais. Por fim, a lança traseira é aberta para permitir a desmontagem do primeiro pórtico de pilar, ficando aberto um corredor de acesso à frente de obra.

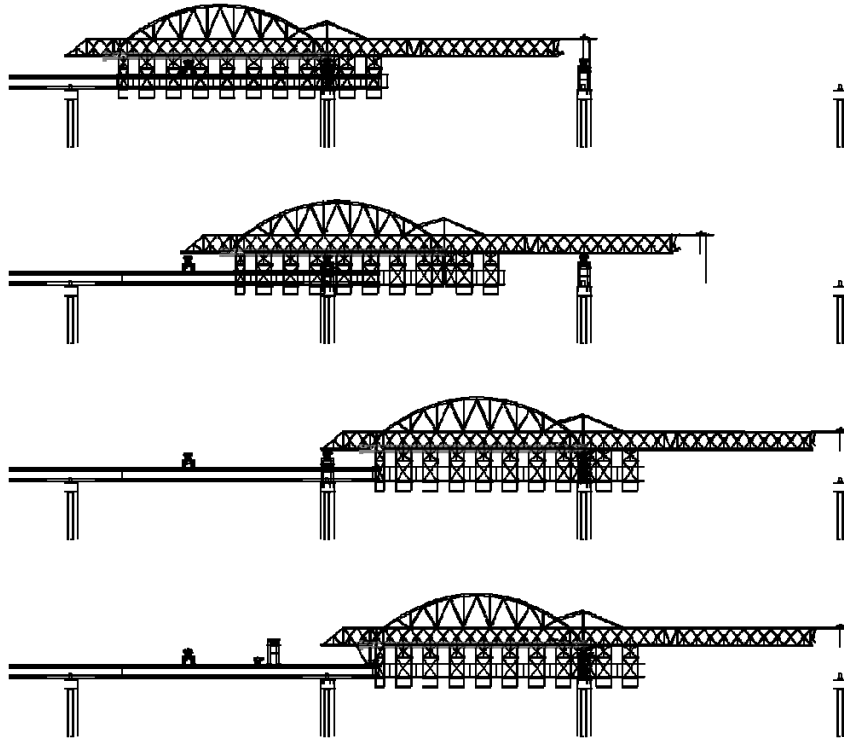


Fig. 11: Sequência de avanço

7 Conclusões

A implementação da tecnologia de pré-esforço orgânico em cimbres autolançáveis tem demonstrado, por parte dos donos de obra, projectistas e construtores uma enorme receptividade, perspectivando-se que a máquina aqui apresentada seja utilizada na construção de pontes e viadutos num futuro próximo.

A conjugação da tecnologia OPS com a eficiência estrutural de um arco resultou numa estrutura metálica do tipo “bowstring” activo, dando origem a um cimbre extremamente leve e funcional, podendo-se destacar as seguintes vantagens relativamente aos cimbres tradicionais:

- Redução do peso do equipamento (pelo menos 25 a 35% do volume de aço);
- Redução de 15% nos custos de aquisição;
- Redução de 10 a 20% nos custos operacionais;
- Controlo de deformações mais eficiente e possibilidade de programar contra-flechas;
- Aumento de segurança devido à monitorização contínua da estrutura;
- Maior facilidade de transporte e montagem em obra;
- Simplificação das ligações metálicas.

Por outro lado, a implementação da tecnologia de pré-esforço orgânico em cimbres autolançáveis, em particular no equipamento M50-S, viabiliza a execução de obras de arte da rede de alta velocidade (RAVE), em que os tabuleiros têm pesos lineares muito superiores (cerca de 30%) aos habituais em vias rodoviárias.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os colaboradores da BERD todo o trabalho e dedicação no desenvolvimento do projecto do equipamento M50-S, em particular aos Eng.º Pedro Borges, António André, André Resende, Inês Ferraz, Frederico Fonseca, Teresa Oliveira e António Guerra que são efectivamente co-autores do presente trabalho. Os agradecimentos estendem-se à Eng.ª Patrícia Gomes da Doka Portugal, por todo o seu empenho na procura da melhor solução de cofragem para este equipamento.

Referências

- [1] Pacheco P, Adão da Fonseca A. “Organic Prestressing”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, 400-405.
- [2] Pacheco P. “Pré-Esforço Orgânico – Um Exemplo de Sistema Efactor”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Porto, Dezembro, 1999.
- [3] André A. “Estudo Experimental da Aplicação de Pré-esforço Orgânico num Cimbra em Modelo Reduzido”, Tese de Mestrado, Dep. Eng. Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [4] Pacheco P. et al, “Strengthening by organic prestressing of existing launching gantries in the construction of high speed railway bridge decks”, *Workshop Bridges for High Speed Railways*, Porto, 289-299, 3 e 4 de Junho de 2004.
- [5] André A, Pacheco P, Adão da Fonseca A. “Experimental study of a launching gantry reduced scale model strengthened with organic prestressing”, *Structural Engineering International*, Journal of IABSE, Vol. 16, N.1, 49-52, 2006.