

PRÉ-ESFORÇO ORGÂNICO - APLICAÇÃO EM CIMBRES AUTOLANÇÁVEIS - BASES DO PROJECTO PILOTO

ANTÓNIO GUERRA, Aluno de Doutoramento, FEUP, Porto
ANTÓNIO ANDRÉ, Aluno de Mestrado, FEUP, Porto
PEDRO PACHECO, Prof. Auxiliar, FEUP, Porto
ANTÓNIO ADÃO DA FONSECA, Prof. Catedrático, FEUP, Porto

SUMÁRIO

Esta comunicação apresenta os tópicos de desenvolvimento do Projecto da primeira aplicação à escala real (Projecto Piloto) de um cimbra autolancável dotado de um sistema de pré-esforço orgânico (OPS). É feita uma descrição geral do Projecto, sendo tratados com particular ênfase os aspectos específicos desta solução tecnológica, tanto na vertente conceptual como na vertente de dimensionamento. São sumariamente identificadas as virtudes da solução em estudo.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de soluções estruturais com carácter adaptativo - “estruturas inteligentes” - é sustentado pela acelerada evolução tecnológica dos últimos anos. Os trabalhos de investigação teórica e experimental desenvolvidos por engenheiros dos Departamentos de Engenharia Civil e de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com a colaboração da empresa de construção Mota-Engil e no âmbito do “Projecto OPS”, confirmam a viabilidade técnica da aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres autolancáveis para construção de pontes e viadutos [1] e [2].

É neste contexto que surge o “Projecto Piloto” – a primeira aplicação de um OPS num cimbra construído especialmente para o efeito, e a ser usado na construção de uma ponte sobre o Rio Sousa.

A Ponte sobre o Rio Sousa em causa, cujo projecto é da autoria da empresa Lisconcebe, integra-se no *Sublanço Lousada - IP4 / A4* pertencente ao *Lanço Guimarães - IP4 / A4* da *A11 / IP9* e localiza-se nas proximidades de Lousada. Tem um comprimento de 450 m e desenvolve-se em 15 vãos de 30 m (ver Figura 1).

O tabuleiro é constituído por uma laje nervurada contínua em betão armado pré-esforçado com uma área de secção transversal próxima de 9.5 m². Os pilares, em betão armado, são constituídos por fustes circulares de 1.50 m de diâmetro e apresentam alturas compreendidas entre os 11 e os 18 m.

Em termos construtivos, trata-se de uma obra corrente, de geometria simples, na qual é apropriado utilizar um cimbre autolanzável.

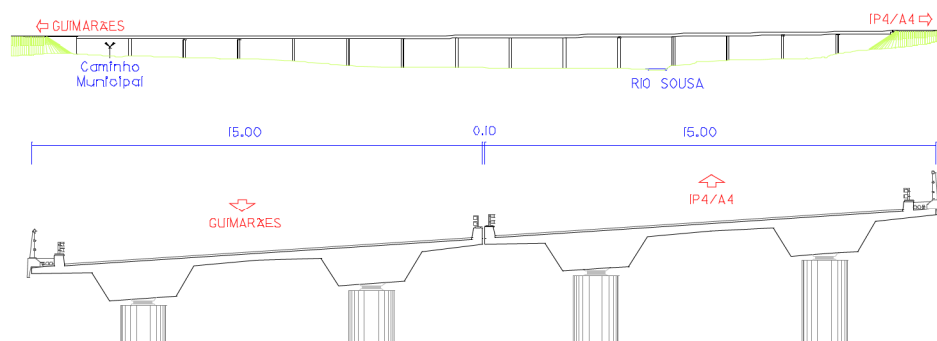


Figura 1 – Alçado e corte transversal da Ponte sobre o Rio Sousa

2. DESCRIÇÃO GERAL DO CIMBRE

O cimbre objecto do Projecto Piloto é um cimbre inferior constituído por quatro vigas de lançamento metálicas. Estas vigas apoiam-se em consolas laterais que são fixas aos pilares por intermédio de colares de atrito (ver Figuras 2 e 3).

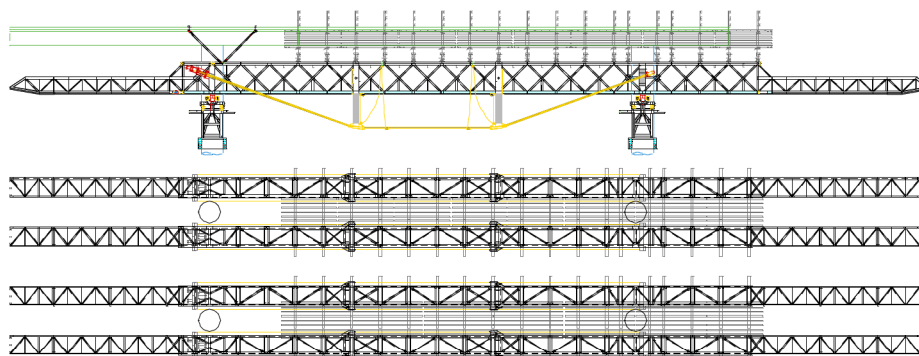


Figura 2 – Alçado e planta do cimbre em posição de betonagem

As vigas são “caixões treliçados” modulares com um comprimento total de 64 m, 40 dos quais constituem a estrutura principal, enquanto os restantes 24 constituem os “narizes”. A secção das vigas (1.25 m x 2.00 m) foi estudada para fácil acomodação em estaleiro e para cumprir requisitos de facilidade de transporte (altura total < 2.30 m). Os perfis de maior expressão são os banzos (HEB 180), sendo as diagonais e montantes realizados por perfis tubulares de dimensões variáveis (o mais robusto é um SHS 120x120x 5).

Cada processo de betonagem desenvolve-se ao longo de $4/5$ do vão entre apoios e $1/5$ do vão seguinte, totalizando 30 m lineares de desenvolvimento (285 m^3 de betão).

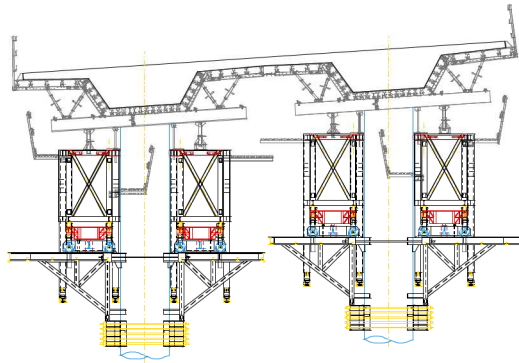


Figura 3 – Corte transversal do cimbra

Em cada viga são instalados dois cabos de pré-esforço localizados em planos verticais exteriores às vigas caixão. O pré-esforço com uma configuração tri-linear é ancorado junto às secções de apoio, sendo desviado por duas “*escoras de desvio*” nos terços do vão. Esses elementos estão equipados de um sistema de rotação que permite a sua recolha (ver Figura 4), de modo a garantir um contorno físico compatível com a movimentação do cimbra (na transposição de vãos).

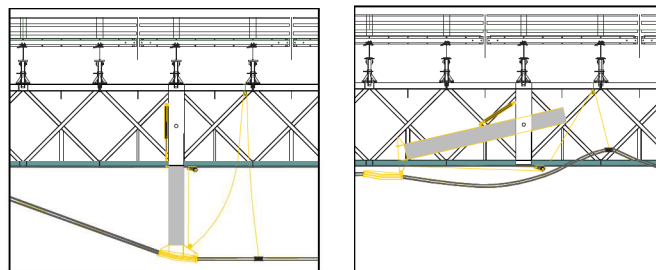


Figura 4 – Sistema de recolha de escoras e cabos

As suas extremidades incorporam *selas de desvio* com a configuração indicada na Figura 5, tendo sido estudadas para minimizar fenómenos de fadiga (“*freting fatigue*”).

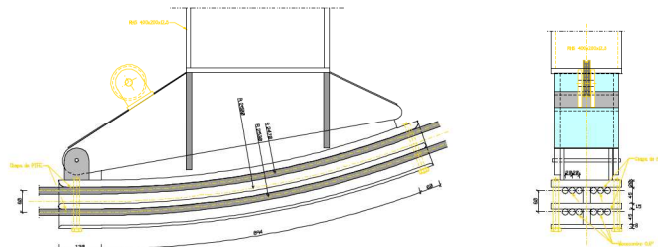


Figura 5 – Sela de desvio

3. BREVE CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA OPS

O sistema de pré-esforço orgânico (OPS) não é mais do que um sistema de pré-esforço no qual as forças aplicadas são automaticamente ajustadas às cargas actuates por um sistema de controlo, de forma a reduzir deformações e minimizar tensões. A solução do sistema OPS preconizada pode ser analisada com mais detalhe noutras publicações [1] e [2].

A implementação do sistema de controlo compreende a integração dos elementos apresentados na Figura 6. A estratégia de controlo baseada no controlo de flechas é particularmente simples e traduz-se na realização de cursos elementares do êmbolo do cilindro hidráulico, afastando ou aproximando a ancoragem orgânica da estrutura, i.e., aumentando ou reduzindo a tensão nos cabos de pré-esforço, em função da flecha a meio vão [2].

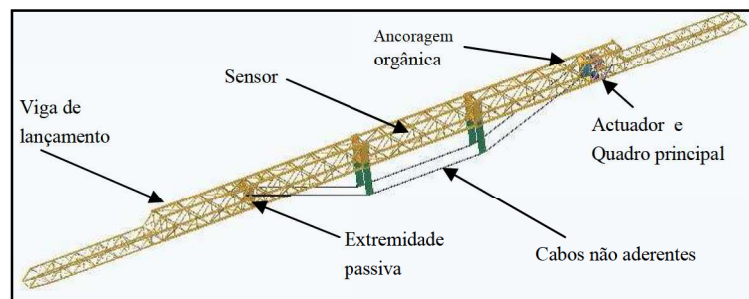


Figura 6 – Inserção física dos elementos do sistema de controlo

- A flecha a meio vão é medida por transdutores de pressão. Para esse efeito, é colocado um reservatório num ponto fixo da estrutura (próximo de um pilar) e colocado o sensor de pressão no meio-vão da mesma, ambos interligados por uma conduta apropriada. Qualquer alteração da pressão hidrostática corresponde a uma variação de flecha do cimbria. Este sistema de medição assegura elevados níveis de precisão [2].
- Os actuadores (macacos hidráulicos) são semelhantes aos usados noutras aplicações da Engenharia Civil, mas sendo adequado limitar as pressões máximas instaladas a valores inferiores aos normalmente adoptadas nesses casos [2]. O curso máximo é dimensionado atendendo não só à variação de comprimento dos cabos pré-definida mas também às perdas de pré-esforço (especialmente elásticas) e à facilidade de montagem dos cabos.
- O controlo é efectuado por um autómato (PLC) localizado no quadro principal. Este autómato, para além de efectuar essa função, inclui uma série de sub-rotinas de segurança que permitem, em cada instante, verificar o estado do cimbria e do sistema de controlo.
- Dadas as características deste tipo de estrutura, cujo desempenho depende intrinsecamente do sistema de controlo, está prevista uma série de medidas suplementares de segurança, das quais se salientam as seguintes: (1) redundância dos equipamentos com menor fiabilidade; (2) utilização de sistemas de comunicação remota para gerar avisos a diferentes intervenientes; (3)

implementação de “filtros” no software para eliminar a influência de vibrações na acção de controlo; (4) recurso a dispositivos mecânicos (ver Figura 7) e hidráulicos (válvulas) para limitar fisicamente os cursos dos actuadores, em caso de avaria.

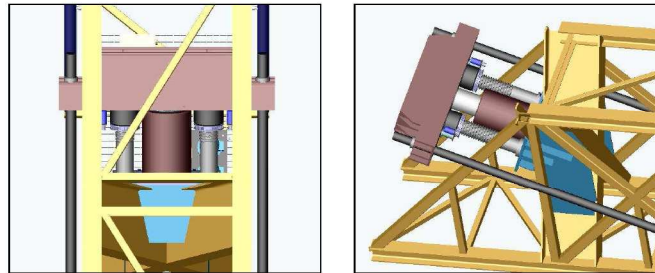


Figura 7 – Ancoragem orgânica e fusos de segurança (limitadores de curso mecânicos)

4. ASPECTOS ESPECÍFICOS DO PROJECTO

No projecto deste cimbra foram efectuadas as verificações de segurança e os procedimentos de cálculo comuns aos projectos de cimbres convencionais. Esses aspectos não são mencionados no presente texto. Os aspectos singulares mais relevantes desta aplicação são sinteticamente mencionados nos parágrafos seguintes.

- A concepção do cimbra foi efectuada em simultâneo com a concepção e dimensionamento do sistema OPS. Esta metodologia, invulgar na generalidade dos sistemas de controlo activo, permite um melhor aproveitamento do sistema, rentabilizando a estrutura e optimizando o comportamento do conjunto. A Figura 8 traduz de forma inequívoca a influência do pré-esforço gerado pelo sistema OPS no funcionamento estrutural do cimbra.

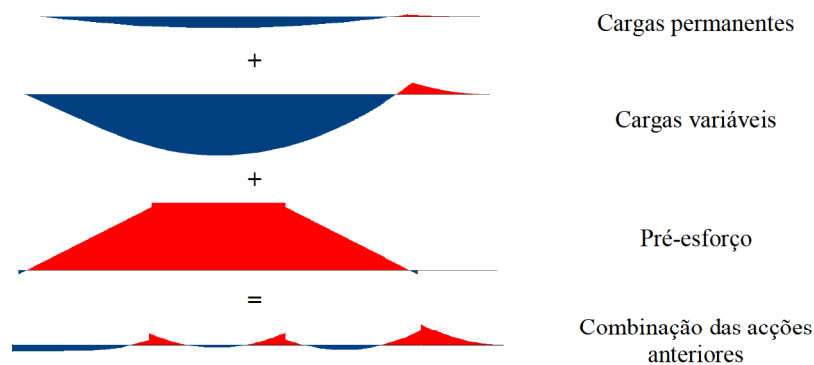


Figura 8 – Momentos flectores no cimbra

A mesma Figura 8 ilustra também a impossibilidade da aplicação de pré-esforço convencional (fixo) neste tipo de estruturas (devido ao efeito nocivo do pré-esforço na ausência de carga).

- A não existência de regulamentação aplicável a estruturas adaptativas implicou o desenvolvimento e a adopção de critérios de dimensionamento. Reconhece-se que estes critérios são bastante conservativos, mas, são justificáveis no contexto de uma aplicação piloto.

No dimensionamento estrutural admitiu-se que, em condições de bom funcionamento do sistema OPS, a força de pré-esforço aplicada é proporcional às cargas a que o cimbre está sujeito. Se eventualmente as cargas crescerem acima do previsto, o sistema OPS “acompanha” tal aumento até a um limite máximo de 125% da força de pré-esforço esperada em serviço.

O comportamento do sistema OPS é representado pela curva “ γ_{OPS} ” na Figura 9, onde “ γ_Q ” é o coeficiente parcial de segurança das cargas e “ γ_P ” é o coeficiente parcial de segurança do pré-esforço.

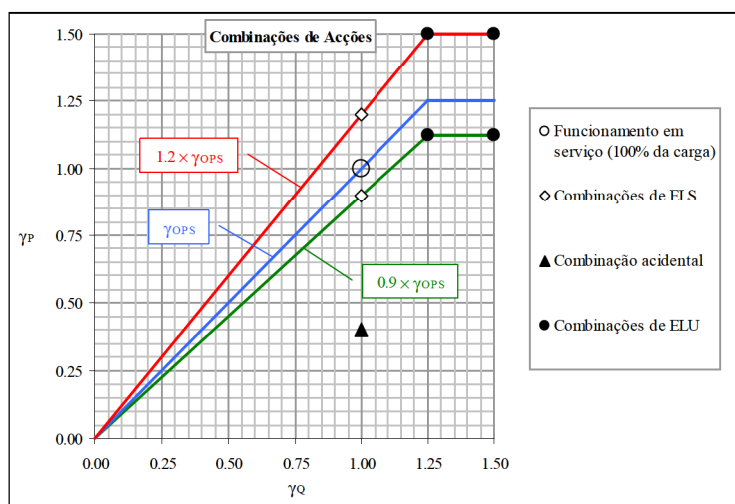


Figura 9 – Representação gráfica das combinações de acções

Portanto, a Figura 9 representa, simplificadamente, a “filosofia” de dimensionamento adoptada, tendo como referência os coeficientes parciais de segurança indicados no EC2 [3], nomeadamente para os efeitos favoráveis e desfavoráveis do pré-esforço. Assim sendo, a curva “ $0.9 \times \gamma_{OPS}$ ” afecta os elementos estruturais nos quais a acção do pré-esforço é favorável enquanto a curva “ $1.2 \times \gamma_{OPS}$ ” contempla a situação contrária.

5. VANTAGENS DA APLICAÇÃO DO SISTEMA OPS

A aplicação de Pré-Esforço Orgânico em cimbres autolancáveis tem como principais vantagens a redução da massa estrutural e a redução drástica de deformações do cimbre. Estas vantagens são comprovadas nas figuras seguintes, onde se compara o comportamento estrutural em serviço das vigas com e sem a utilização do sistema OPS.

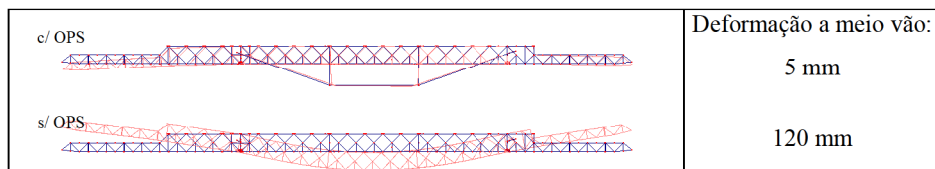


Figura 10 – Deformação do cimbra (com e sem OPS)

Naturalmente, se este cimbra fosse dimensionado para ser utilizado sem o sistema OPS teria que ser significativamente mais robusto (para ter flechas máximas da ordem de 75 mm, i.e., $L/400$). Mas mesmo perante esse caso, o OPS assegura uma redução de flechas superior a 90%.

Na corda superior, o OPS permite quase anular a compressão associada à deformação por flexão, introduzindo compressões associadas a esforços axiais. A redução de tensões é da ordem de 60%. Na corda inferior, as tracções dão lugar a compressões com valores absolutos 40% inferiores aos que se verificariam caso não se utilizasse o sistema OPS.

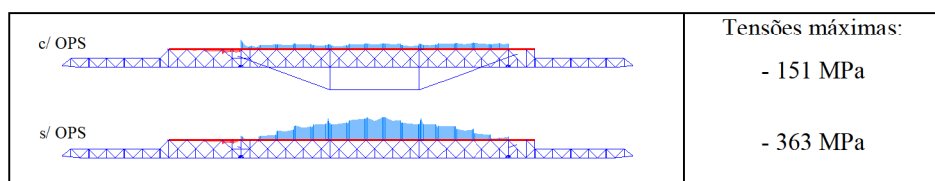


Figura 11 – Tensões na corda superior (com e sem OPS)

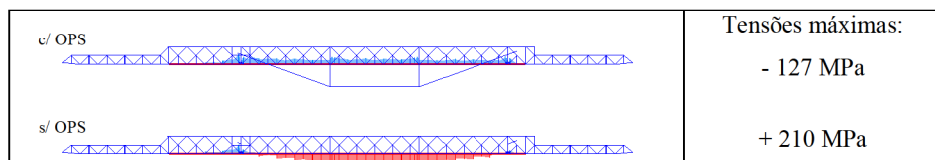


Figura 12 – Tensões na corda inferior (com e sem OPS)

O cimbra desenvolvido no âmbito do presente Projecto Piloto tem um peso total próximo de 120 toneladas, o que conduz a um valor de 170 kg por tonelada de betão construído. Os valores típicos deste tipo de estruturas variam entre 250 e 500 kg de aço por tonelada de betão construído [4]. Ou seja, está-se perante uma solução que permite, seguramente, uma redução de 30% em relação às soluções convencionais mais optimizadas.

Note-se que esta vantagem não só se repercute no custo de aquisição do equipamento mas também nos custos de exploração, nomeadamente armazenamento, transporte, montagem e movimentação em obra, os quais, de acordo com dados da indústria, poderão significar na vida de um cimbra (com 6 utilizações) o dobro do seu custo de aquisição [5].

6. CONCLUSÕES

A implementação de cimbres reforçados com OPS irá viabilizar uma nova escala de “pesos” de cimbres autolanzáveis. A redução de massa estrutural em causa, avaliada em valores da ordem de 30 %, representa não só uma redução de custos de aquisição mas também, e principalmente, uma considerável redução dos custos de exploração.

As dificuldades inerentes à implementação do sistema OPS em cimbres autolanzáveis são contornadas através da implementação de soluções de razoável simplicidade. Na ausência de prescrições regulamentares para o dimensionamento deste tipo de estruturas, têm sido estudados e desenvolvidos critérios específicos para o efeito.

A entrada em utilização do cembre com OPS aqui apresentado, prevista para o final do presente ano, reveste-se de enorme significado no âmbito do desenvolvimento de novas tecnologias na área dos processos construtivos.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Mota-Engil S.A. todo o apoio técnico e financeiro prestado, sem o qual não teria sido possível desenvolver o presente Projecto Piloto, realçando-se a colaboração dos seus técnicos Sr. David Ramos, Sr. Paula Santos e Eng.º Rui Campos.

Agradece-se também a colaboração da Empresa AFAssociados, especialmente do Eng. Rui Oliveira, responsável pelo desenvolvimento da estrutura metálica.

Finalmente, agradece-se a colaboração dos colegas de Engenharia Mecânica colaboradores do grupo OPS, os Profs. Francisco Freitas e Joaquim Mendes, e os Eng.s Carlos Pinto e Teresa Oliveira, que de certa forma são co-autores do presente trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- [1] André, A. et al – “Pré-Esforço Orgânico Estudos sobre a aplicação de uma Nova Tecnologia” em *Tecnovisão*, 2004, p. 15-23.
- [2] Pacheco, P. et al. – “Strengthening by organic prestressing of existing launching gantries in the construction of high speed railway bridge decks”, in proceedings of Workshop “*Bridges for high-speed railways*”, Porto, 3e4 de Junho de 2004, p. 289-299.
- [3] NP ENV 1992-1-1:1991 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão; Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [4] Baptista, M. – “Análise diferida de pontes construídas tramo a tramo com cimbres autoportantes e auto-lanzáveis”, *Tese de Mestrado*, FEUP, 1995.
- [5] Ramos, D. – “Viga de Lançamento – Custos Inerentes à sua utilização numa obra”, *Documento Técnico Mota-Engil*, 2004.