V CONGRESSO
DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

CIMBRE AUTOLANÇÁVEL COM PRÉ-ESFORÇO ORGÂNICO

António Guerra [1], António André [2], Rui Oliveira[3] e Pedro Pacheco [4]

RESUMO

A presente comunicação refere-se ao Cimbre do Rio Sousa, um equipamento que se distingue de outros cimbres por ser dotado de um sistema de pré-esforço auto-ajustável designado por Sistema de Pré-esforço Orgânico (OPS). Para além de uma breve caracterização do cimbre e do funcionamento do sistema OPS, são apresentados alguns dos aspectos particulares de concepção, de cálculo e de dimensionamento da estrutura metálica, assim como as principais ilações obtidas após a construção da ponte na qual se aplicou pela primeira vez esta nova tecnologia.

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", confirmaram a viabilidade técnica da aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres autolançáveis para construção de viadutos e pontes [1,2,3,4]. É neste contexto que surge a primeira aplicação de um sistema OPS num cimbre construído especialmente para o efeito, e usado na construção de uma ponte entre Abril e Setembro de 2005.

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 dois tabuleiros independentes de 15 vãos de 30 m.

O tabuleiro é constituído por uma laje nervurada contínua em betão armado pré-esforçado com uma área de secção transversal próxima de 9.5 m^2. Os pilares, em betão arma-

[1] Aluno de Doutoramento, Dept. Eng. Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
[2] Eq. Assist. 2º triénio, Área Departamental Eng. Civil, EST-Universidade do Algarve, Portugal.
[3] Engenheiro Civil, AFAssociados, Portugal.
[4] Professor Auxiliar, Dept. Eng. Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

do, são constituídos por fustes circulares de 1.50 m de diâmetro e apresentam alturas compreendidas entre os 11 e os 18 m.

2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO CIMBRE

2.1 Estrutura Metálica

O cimbre do Rio Sousa é um cimbre autolançável inferior constituído por quatro vigas de lançamento metálicas independentes. Estas vigas apoiam-se em consolas laterais fixas aos pilares por intermédio de colares de atrito (ver Figs. 1 e 2).

As vigas são "caixões treliçados" modulares com um comprimento total de 64 m, 40 dos quais constituem a estrutura principal, enquanto os restantes 24 materializam os "narizes". A estrutura principal das vigas tem uma secção de 1.25 m de largura por 2.00 m de altura. Os perfis de maior expressão são as cordas (HEB 180), sendo as diagonais e montantes realizados por perfis tubulares de dimensões variáveis (o mais robusto é um SHS 120x120x5) [5,6].

2.2 Sistema OPS

O sistema de pré-esforço orgânico, assim designado por ser conceptualmente baseado

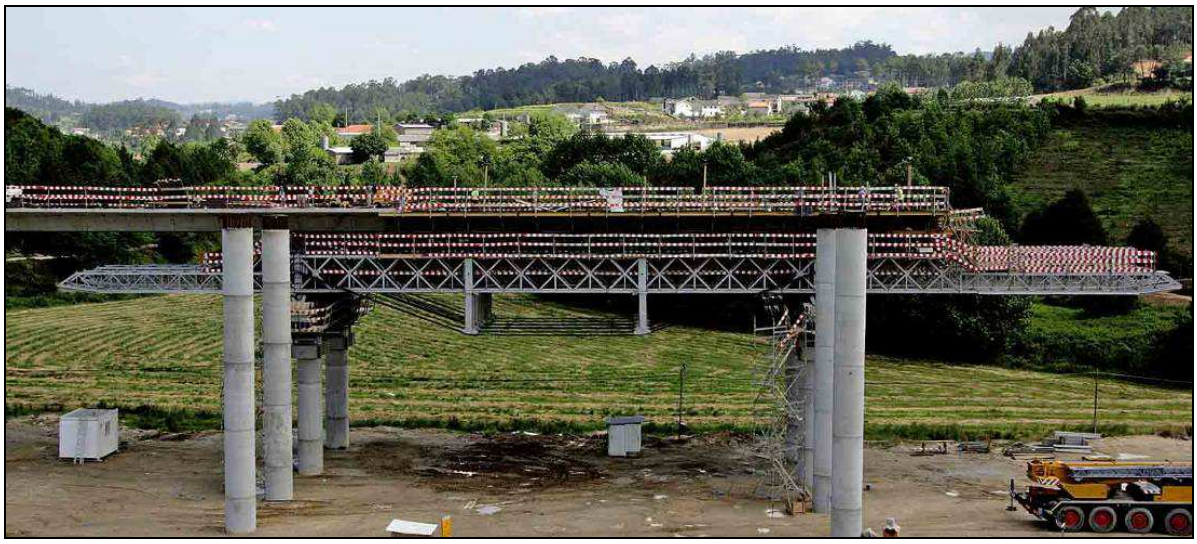

Fig. 1 – Alçado do cimbre em posição de betonagem

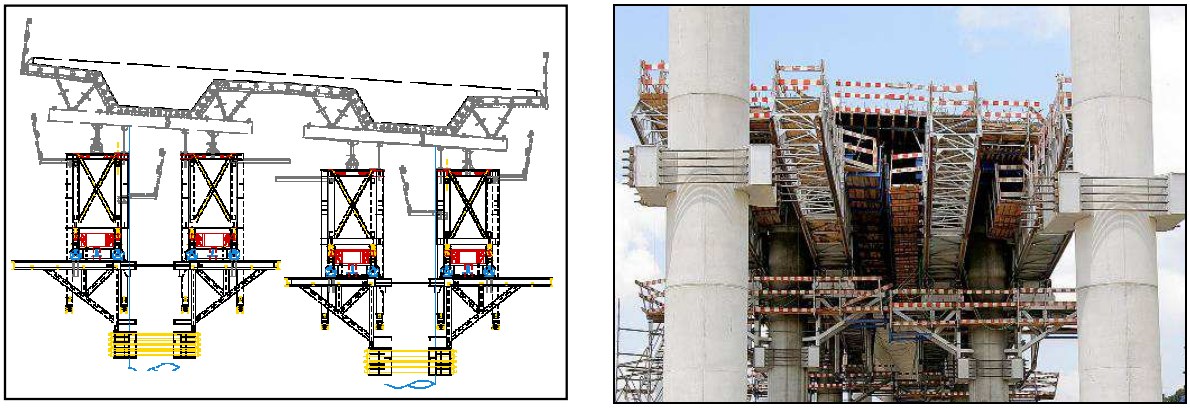

Fig. 2 – Corte transversal do cimbre (esquerda); Vista frente do cimbre (direita)

numa estrutura orgânica – o músculo, é uma forma de pré-esforço adaptativa, em que as forças aplicadas são automaticamente ajustadas às cargas actuantes por um sistema de controlo, de forma a reduzir deformações e minimizar tensões [1,2,3].

A implementação do sistema de controlo compreende a integração dos elementos apresentados na Fig. 3. A estratégia de controlo 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, medida por transdutores de pressão criteriosamente posicionados ao longo das vigas. A informação recolhida é transmitida ao autómato e processada de acordo com um algoritmo de controlo que "decide" entre manter ou variar a intensidade do pré-esforço [7].

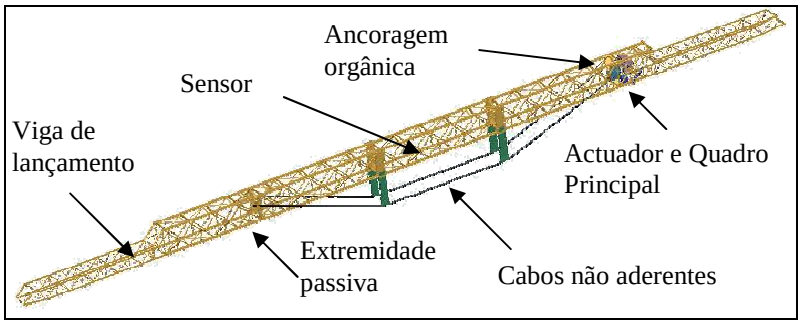

Fig. 3 – Elementos do sistema de controlo

3. ASPECTOS PARTICULARES DO CIMBRE

3.1 Elementos estruturais

3.1.1 Escoras e selas de desvio

Em cada viga existem dois cabos de pré-esforço, constituídos por doze monocordões auto-embainhados, localizados em planos verticais exteriores às vigas. 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 [5,6].

As escoras de desvio são perfis tubulares rectangulares que têm como finalidade o desvio dos cabos de pré-esforço e a transmissão da força de desvio para a estrutura metálica. Estes elementos estão equipados com um sistema de rotação que permite a sua recolha (Fig. 4), de modo a garantir um contorno físico compatível com a movimentação do cimbre aquando da transposição de vãos.

Fig. 4 – Sistema de recolha de escoras e cabos

Na extremidade das escoras de desvio encontram-se as selas de desvio, concebidas de forma a desviar o cabo de pré-esforço sem ferir as bainhas dos cordões. Para atender a este efeito, as superfícies de contacto das selas com os monocordões foram revestidas com PTFE (Politetrafluoretileno). Para permitir a recolha dos cabos, as selas contemplam um sistema de "abertura" que possibilita uma constante adaptação da sua posição e deste modo um funcionamento compatível com a rigidez dos monocordões (Fig. 5).

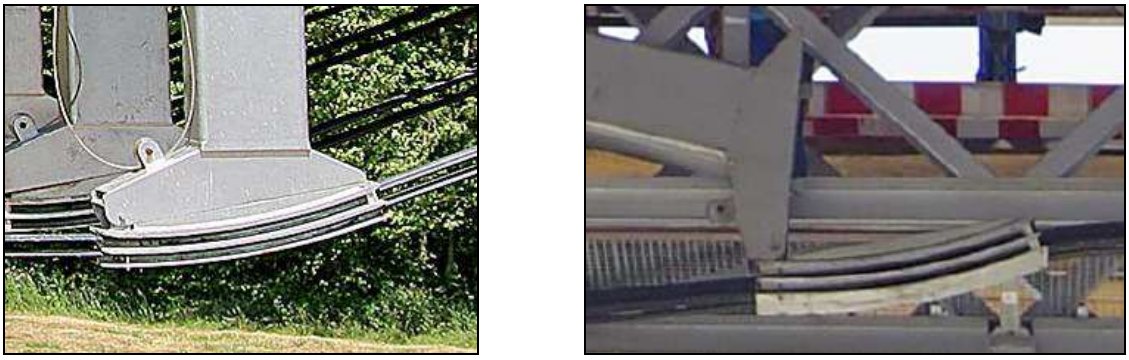

Fig. 5 – Sistema de "abertura" das selas de desvio

3.1.2 Extremidade activa e extremidade passiva

A ancoragem orgânica (extremidade activa) inclui uma viga que se apoia num actuador (cilindro hidráulico) permitindo tensionar simultaneamente os dois cabos de pré-esforço, cujos monocordões são ancorados através de extrusões colocadas nas suas extremidades.

Os actuadores são semelhantes aos usados noutras aplicações da Engenharia Civil. Por questões de segurança, o seu curso encontra-se limitado pelo software de controlo e também fisicamente, por dois fusos e respectivas fêmeas que, em caso de avaria do actuador, impedem a diminuição da força dos cabos de pré-esforço [3].

Fig. 6 – Extremidade activa (esquerda); Extremidade passiva (direita)

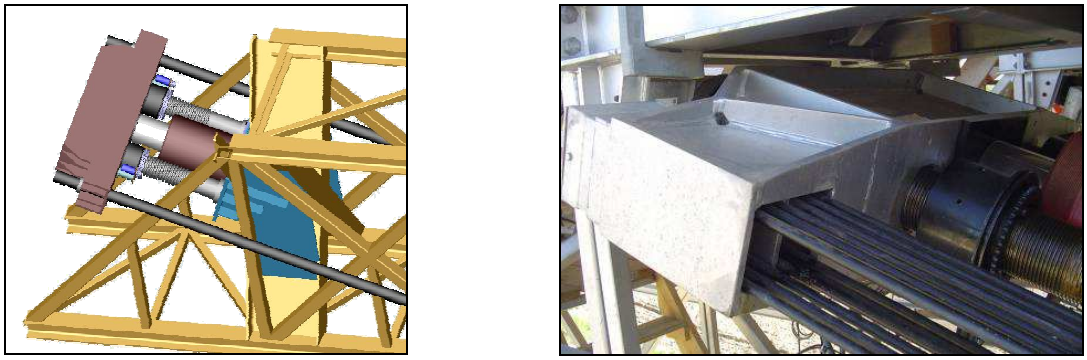

Fig. 7 – Ancoragem orgânica e fusos de segurança

3.2 Aspectos particulares de concepção

Num cimbre autolançável são relevantes duas fases fundamentais: a fase de betonagem e a fase de avanço

No que diz respeito à fase de betonagem, o facto da concepção do cimbre ter sido efectuada em simultâneo com a concepção e dimensionamento do sistema OPS, permitiu um melhor aproveitamento do sistema, rentabilizando a estrutura e optimizando o comportamento do conjunto. Esta metodologia de abordagem, embora invulgar na generalidade dos sistemas de controlo activo, foi indispensável dada a inequívoca influência do pré-esforço gerado pelo sistema OPS no funcionamento estrutural deste cimbre (Fig. 8).

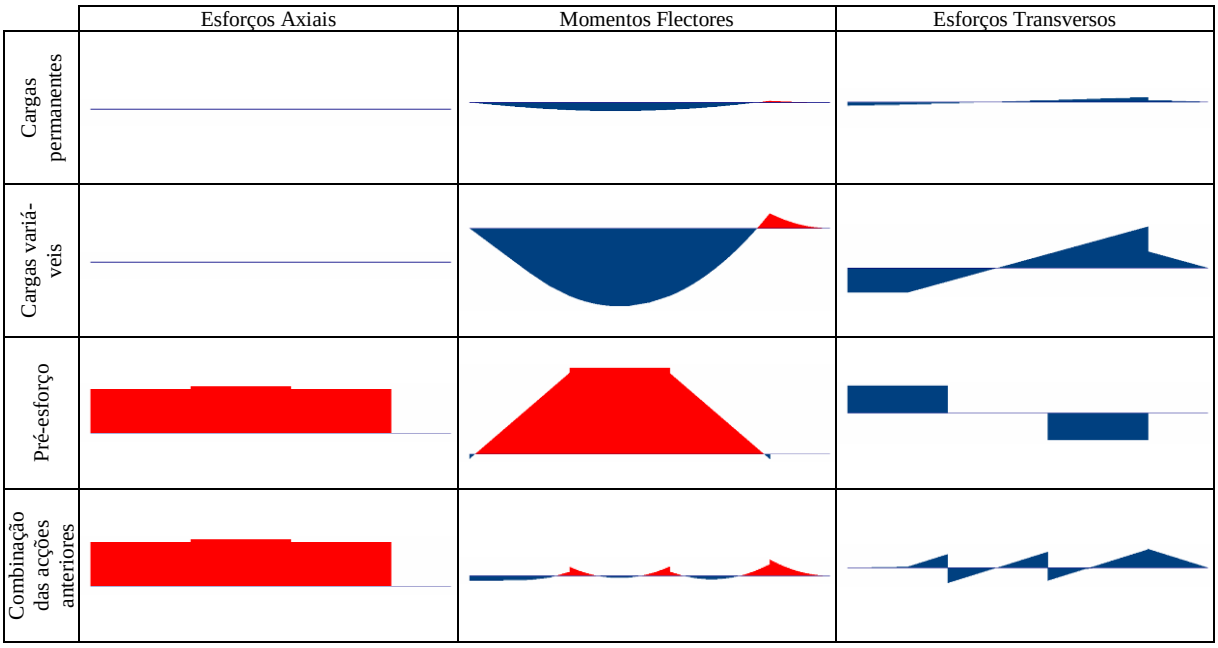

Fig. 8 – Esforços flectores no cimbre (fase betonagem)

Conforme se pode constatar nos diagramas da Fig. 8, a zona de betonagem em consola (1/5 do vão seguinte) não dispõe de pré-esforço orgânico. Esta opção deveu-se não só ao facto de os esforços actuantes serem da mesma ordem de grandeza dos da fase de avanço, mas também pelo facto das deformações serem reduzidas (≈ 12 mm; $L/1000$), e ainda, por significar uma considerável simplicidade no que diz respeito a aspectos como o traçado de pré-esforço e a estratégia de controlo.

Estruturalmente, cada viga (com apoios afastados de 30 m) tem esforços de flexão praticamente iguais aos de uma viga contínua com 3 vãos de 10 m, já que as forças verticais transmitidas directamente pelas escoras de desvio, e indirectamente pelos troços inclinados dos cabos de pré-esforço podem ser consideradas como dois apoios localizados nos terços do vão, e que reduzem em 60% os esforços transversos e em 80% os momentos flectores.

Note-se que estas reduções de esforços não podem ser vistas isoladamente, porque em contrapartida, cada viga fica sujeita a um esforço axial da ordem dos 2000 kN, que em conjunto com os restantes esforços, correspondem a reduções de 60% nas tensões de compressão das cordas superiores, e de 40% no valor absoluto das tensões das cordas inferiores, que passam a estar comprimidas.

Relativamente à fase de avanço salienta-se que a estrutura metálica do Cimbre do Rio Sousa é autoportante. O sistema OPS é desligado e a movimentação decorre tal como nos cimbres convencionais correntes.

Na fase de concepção de um cimbre é conveniente que a fase de betonagem e a fase de

avanço sejam analisadas em conjunto. Esta abordagem tem como objectivo aumentar a utilidade dos diversos elementos estruturais nas diferentes situações de apoio e nas diferentes fases de carregamento a que o cimbre está sujeito durante a sua utilização. A geometria das diagonais e a proporção entre a altura das treliças e a expressão das suas cordas são dois exemplos de decisões importantes na optimização de uma estrutura com estas características.

3.3 Aspectos particulares de dimensionamento

A inexistência de regulamentação aplicável a estruturas adaptativas implicou o desenvolvimento e a adopção de critérios de dimensionamento, porventura bastante conservativos, mas 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.

Na Fig. 9, o comportamento do sistema OPS é representado pela curva "γOPS", onde "γQ" é o coeficiente parcial de segurança das cargas e "γP" é o coeficiente parcial de segurança do pré-esforço.

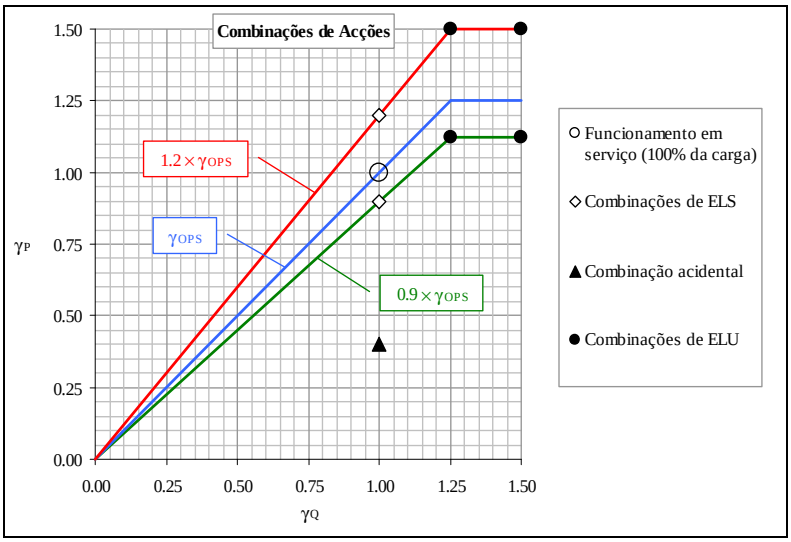

Fig. 9 - Representação gráfica das combinações de acções

Este gráfico representa, simplificadamente, a "filosofia" de dimensionamento adoptada, tendo como referência os coeficientes parciais de segurança indicados no EC2 [8], nomeadamente para os efeitos favoráveis e desfavoráveis do pré-esforço. Assim sendo, as combinações sobre a curva "0.9×γOPS" afectam os elementos estruturais nos quais a acção do pré-esforço é favorável enquanto as combinações sobre a curva "1.2×γOPS" contemplam a situação contrária.

3.4 Aspectos particulares de cálculo

Ao nível do cálculo da fase de betonagem salienta-se a importância de uma modelação conjunta da estrutura metálica e do sistema de pré-esforço, não só para avaliação dos acréscimos de força nos cabos por efeito passivo, mas também para determinação do curso dos actuadores, contemplando, desta forma, as deformações elásticas dos monocordões e da própria estrutura metálica.

A verificação da estabilidade global por efeito de bambeamento e/ou de varejamento transversal por acção do pré-esforço, é uma questão importante. O estudo realizado permitiu comprovar que os cabos de pré-esforço desempenham um papel fundamental, travando a estrutura nos pontos de contacto com a mesma. Para atender a este efeito, e para que os comprimentos de bambeamento e varejamento possam ser considerados 10 m (afastamento entre pontos de contacto) houve a preocupação de ligar as escoras de desvio às vigas de modo a ser possível absorver acções transversais.

O cálculo da fase de avanço é um cálculo semelhante ao de uma estrutura metálica corrente. No entanto, o facto de todas as secções passarem pelo meio-vão e também sobre os apoios exige a modelação da estrutura em inúmeras situações de apoio distintas, de modo a que seja determinado para cada elemento estrutural a situação mais desfavorável.

3.5 Aspectos particulares de fabrico

Atendendo à existência de elementos com requisitos funcionais importantes os aspectos mais sensíveis foram previamente testados (Figs. 10-12).

Fig. 10 – Montagem e ensaio da extremidade orgânica

Fig. 11 – Montagem preliminar e ensaio dos sistema de recolha de escoras de desvio

Fig. 12 – Ensaio da capacidade resistente da colagem do PTFE das selas de desvio

A realização das montagens preliminares e dos ensaios realizados no laboratório da FEUP, nas instalações da Mota-Engil Pré-esforço e nas intalações da Martifer (metalomecânica responsável pelo fabrico), em conjunto com os pareceres dos técnicos de obra da Mota-Engil permitiram melhorar, atempadamente, aspectos como por exemplo a fixação do PTFE das selas de desvio, folgas e tolerâncias na extremidade orgânica e no sistema de recolha de escoras, entre outros.

3.6 Aspectos particulares de exploração

Por se tratar de uma tecnologia nunca antes utilizada à escala real, antes da primeira betonagem, realizaram-se ensaios de carga com cerca de 50 000 litros de água, tendo-se confirmado a fiabilidade do sistema de controlo e respectivo software (Fig. 13).

Após a realização do primeiro tabuleiro a leveza do cimbre permitiu realizar a desmontagem, o transporte e a remontagem no início do segundo tabuleiro no prazo de uma semana (Fig. 14).

De 7/4/2005 (data da primeira betonagem) até 15/9/2005 (data do fecho do 2.º tabuleiro) decorreram 24 semanas, e foram construídos 690 m (23 × 30 m) de tabuleiro. O ciclo de trabalho tipo foi de um tramo por semana, tendo-se realizado, quando na presença de feriados, ciclos de 4 dias. Salienta-se que a obra foi construída em menos 32 dias do que o que estava inicialmente previsto.

4. CONCLUSÕES

Dos trabalhos desenvolvidos concluiu-se que, a optimização de uma estrutura equipada com um sistema de pré-esforço orgânico só é possível se a sua concepção e dimensionamento contemplar o efeito do conjunto estrutura – sistema de controlo.

Fig. 13 – Ensaios de carga em obra em 3 de Abril de 2005

Fig. 14 – Desmontagem e transporte para remontagem no 2.º tabuleiro (29 de Junho de 2005)

No que diz respeito à regulamentação para o dimensionamento de estruturas com carácter adaptativo muito há ainda para melhorar, no entanto a metodologia descrita mostrou ser capaz de responder às necessidades de segurança necessárias.

O cimbre da ponte do Rio Sousa comprovou que, face aos cimbres correntes, a sua aquisição e utilização apresentam vantagens inequívocas:

- 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.

Com a implementação da tecnologia de pré-esforço orgânico a cimbres autolançáveis perspectivam-se diversas vantagens competitivas, nomeadamente:

- Na execução de obras de arte da rede de alta velocidade (RAVE) devido ao facto do Sistema OPS viabilizar a utilização de equipamentos existentes para a construção de tabuleiros com pesos lineares superiores (cerca de 30%) aos habituais em vias rodoviárias [3];
- Na execução de pontes e viadutos construídos tramo a tramo em obras de médio/grande vão para os quais não sendo viável utilizar cimbres autolançáveis convencionais, são implementados outros processos construtivos.

Fig. 15 – Fotografia do fecho da ponte

5. 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. Agradecem também o apoio da Martifer, nomeadamente nos trabalhos experimentais antecedentes.

Agradecem finalmente a colaboração do Eng.º Sérgio Vale (AFAssociados), dos Professores Francisco Freitas e Joaquim Mendes e dos Eng.os Carlos Pinto e Miguel Silva (IDMEC-FEUP), e dos Eng.os Pedro Borges, Hugo Coelho, Bernardino Lima e Teresa Oliveira (Grupo OPS-FEUP), que de certa forma são co-autores do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS

[1] Pacheco, P. – Tese de doutoramento em engenharia civil "Pré-Esforço Orgânico – Um Exemplo de Sistema Efector", Porto, Dezembro, 1999.

[2] André, A. Estudo Experimental da Aplicação de Pré-esforço Orgânico num Cimbre em Modelo Reduzido, Tese de Mestrado, Dep. Civil Eng., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

[3] 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, 3 e 4 de Junho de 2004, p. 289-299.

[4] Oliveira, Teresa – Trabalho final da disciplina de Laboratórios de Automação "Controlo Automático de Pré-esforço Orgânico em Cimbres", FEUP, 2003.

[5] Grupo OPS, Manual Técnico, Cimbre Autolançável com OPS, Projecto Piloto do Cimbre do Rio Sousa, FEUP/Mota-Engil, 2005.

[6] Guerra, A.; André, A.; Pacheco, P.; Adão da Fonseca, A., R., Pré-esforço Orgânico - Aplicação em Cimbres Autolançáveis - Bases do Projecto Piloto, Betão Estrutural, 2004, Porto, pág. 1089-1096.

[7] Pacheco, P.; Adão da Fonseca A. – "Organic Prestressing", em Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, p. 400-405.

[8] NP ENV 1992-1-1:1991 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão; Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios.