

## ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO ORGÂNICO EM CIMBRES AUTOLANÇÁVEIS



**A.M. ANDRÉ**  
Eq. Assist. 2º Tr.  
EST - UALG  
Faro



**P. A. PACHECO**  
Prof. Auxiliar  
FEUP  
Porto



**A. ADÃO DA FONSECA**  
Prof. Catedrático  
FEUP  
Porto

### SUMÁRIO

O presente artigo descreve o estudo experimental dum modelo reduzido de um cimbra autolanzável reforçado com recurso à tecnologia de pré-esforço orgânico (OPS). Analisam-se os resultados obtidos e comprova-se que este sistema confere aos cimbres um significativo aumento da capacidade de carga, reduzindo simultaneamente as flechas de serviço. Confirma-se também a exequibilidade técnica do sistema.

### 1. INTRODUÇÃO

O pré-esforço orgânico (OPS), assim designado por ser conceptualmente baseado numa estrutura orgânica – o músculo, é uma forma de pré-esforço auto-ajustável, i.e., com características adaptativas [1]. A materialização do conceito de OPS inclui três elementos fundamentais: as “ancoragens orgânicas”, os cabos de pré-esforço (não aderentes) e o circuito electrónico [2].

As tecnologias envolvidas são semelhantes às usualmente utilizadas em estruturas com pós-tensão com cabos não aderentes, sendo o circuito electrónico (PLC e outros componentes electrónicos) semelhante aos circuitos de sistemas de controlo activo comuns [3].

A estratégia de controlo inicialmente desenvolvida [1] baseava-se no controlo de tensões da secção localizada a meio-vão. Por questões de índole tecnológica, desenvolveu-se uma estratégia fundamentada no controlo da flecha da mesma secção, traduzida matematicamente pelas expressões seguintes [4]:

$$\begin{cases} u(t_i) > u_c & \Rightarrow nc(t_i + Dt) = nc(t_i) + 1 \\ u(t_i) \leq u_c & \Rightarrow nc(t_i + dt) = nc(t_i) \end{cases} \quad (1)$$

onde,

$u(t_i)$  é a deformação a meio-vão no instante  $t_i$ ;  
 $u_c$  é o limite predefinido para a deformação a meio-vão;  
 $nc(t_i)$  é o número de cursos elementares executados até ao instante  $t_i$ ;  
 $Dt$  é o atraso na resposta do sistema de controlo;  
 $dt$  é o tempo de análise considerado no algoritmo de controlo.

A aplicação de OPS em estruturas de engenharia civil tem sido estudada desde 1994. As conclusões já divulgadas [4] [5] revelam que, em estruturas sujeitas a cargas variáveis com uma importância relativa elevada, o pré-esforço orgânico pode constituir uma solução muito vantajosa na medida em que permite uma substancial redução de perdas de pré-esforço e assegura uma notória redução dos efeitos desfavoráveis associados ao pré-esforço convencional. Os cimbres autolanzáveis são um exemplo desse tipo de estruturas.

Em Outubro de 2002, numa colaboração entre o grupo OPS (FEUP) e a Engil SA (actual Mota-Engil), iniciou-se o estudo para a concepção de um modelo reduzido de um cimbra autolanzável, com vista à aferição da tecnologia de pré-esforço orgânico desenvolvida e à verificação dos resultados numéricos anteriormente obtidos.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

O modelo experimental é constituído por uma viga-caixão metálica de almas treliçadas, composta por cantoneiras de abas iguais e apoiada em suportes metálicos fixos na laje de reacção do laboratório.



Figura 1: Modelo laboratorial com simulador de carga (“caixas” para enchimento com água)

O modelo tem um comprimento total ( $L$ ) de 14 m e vence um vão entre apoios de  $4/5L$ , estando a restante parte ( $1/5L$ ) em consola. A secção transversal tipo é quadrada ( $0,40 \times 0,40 \text{ m}^2$ ) e apresenta áreas desiguais nos banzos inferior e superior (os banzos superiores tem maior secção) excepto na zona junto ao apoio de continuidade, onde os banzos são iguais.

O modelo experimental foi concebido para validação do sistema OPS, atendendo preferencialmente a questões funcionais e sem atender às regras clássicas de proporção dos modelos reduzidos quantitativos. Também não foram contemplados aspectos relacionados com a cinemática/movimentação dos cimbres autolanzáveis.

O pré-esforço é materializado por dois cabos de aço de alta resistência exteriores à viga e com traçado definido pelas selas de desvio e pontos de amarração. A amarração dos cabos na extremidade da consola é passiva e na extremidade sobre o apoio é activa. A aplicação do pré-esforço à estrutura é efectuada através do afastamento da extremidade activa do cabo em relação ao cimbra. Esse afastamento é realizado por um cilindro hidráulico de alta precisão, ligado a um grupo bomba-hidráulica controlado por um autómato (PLC).

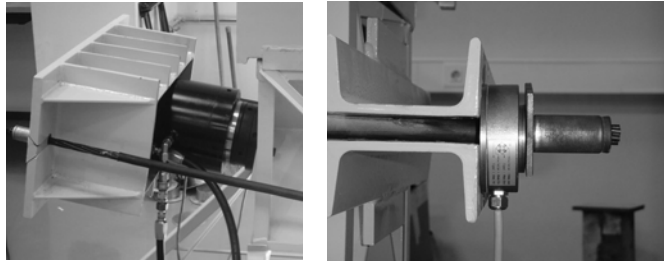


Figura 2 – Extremidades activa (com ancoragem orgânica) e passiva

O cilindro hidráulico encontra-se localizado entre uma placa de reacção soldada no topo da viga e uma peça metálica dimensionada para receber a “cabeça” do cilindro e as extrusões dos cabos. A extremidade passiva é semelhante às ancoragens de extrusão convencionais.

O modelo experimental permite simular a betonagem do tabuleiro de uma ponte ou viaduto através de um carregamento lento (estático) – enchimento das “caixas” com água. Note-se que o facto do carregamento ser “lento” permite que o OPS seja um sistema de controlo estático.

O controlo do OPS é realizado a partir de uma secção de controlo [3] localizada a meio do vão de  $4/5xL$ , instrumentada com um transdutor de pressão. A informação recolhida na secção de controlo é transmitida ao autómato e processada de acordo com o algoritmo de controlo [3], mantendo o sistema num estado de inactividade ou fazendo variar a intensidade do pré-esforço.

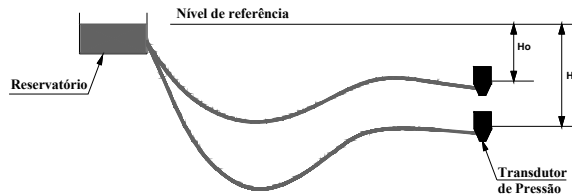


Figura 3: Medição da variação de cota com transdutores de pressão [6]

Os transdutores de pressão são sensores que medem variações de pressão na forma de sinal eléctrico. Utilizam-se em várias aplicações na engenharia estrutural, por exemplo na medição

de diferenças de cotas ou deformação. A estratégia de medição é simples e baseia-se na diferença de pressão entre um reservatório preenchido com um fluido líquido localizado num ponto fixo e o transdutor de pressão, ligados por vasos comunicantes [6].

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Realizaram-se ensaios experimentais que simulam o funcionamento estático dum cembre autolanzável em serviço. Foi efectuada uma aferição rigorosa da semelhança entre o modelo numérico e o modelo experimental, recorrendo a ensaios específicos para determinação das características físicas dos materiais e a medições das características geométricas do modelo.

#### 3.1 Simulação de betonagem do tabuleiro

São seguidamente apresentados os resultados de ensaios que simulam os dois processos de betonagem mais comuns (independentemente de a betonagem ser efectuada com balde ou mangueira). Para cada um, procedeu-se à avaliação do comportamento dos modelos com e sem aplicação do OPS, tendo-se efectuado a simulação da betonagem com água utilizando, para o efeito, uma mangueira. Fixaram-se níveis de carga máximos moderados.

- Processo de execução do tipo A

No processo de execução do tipo A, a betonagem é efectuada simetricamente em relação ao apoio dianteiro, de forma a reduzir a rotação na secção do apoio. Para implementar este processo é conveniente a utilização de duas mangueiras. Nos ensaios experimentais – ensaio 1 (com OPS) e ensaio 2 (sem OPS), utilizou-se apenas uma mangueira, alternando-se o enchimento das caixas entre cada um dos vãos em relação ao apoio.

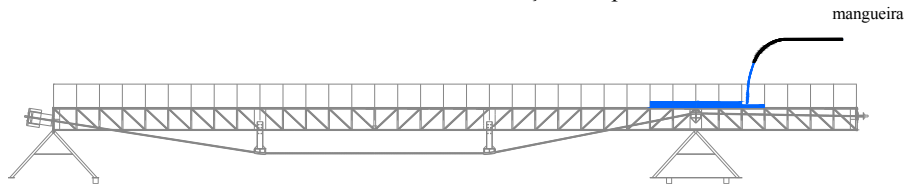


Figura 4: Processo de execução do tipo A – carregamento simétrico em relação ao apoio

Nos gráficos seguintes verifica-se a semelhança de deformações avaliadas no modelo numérico e no modelo experimental. Os valores nulos iniciais devem-se ao equilíbrio exacto das cargas colocadas de uma forma simétrica relativamente ao apoio, apenas possível numericamente. A elevada precisão do transdutor de pressão regista a oscilação provocada pela água durante o carregamento do modelo e outras vibrações ambientais.

Nos gráficos que se seguem é usada a seguinte notação:

**u** - flecha a meio vão; **Lc** – curso do actuador;  **$\sigma_b$**  – tensão no banzo b (i -inferior ou s- superior)

Adoptam-se ainda as contracções *num.* e *exp.*, para se referir a grandezas afectas aos modelos numérico e experimental, respectivamente.

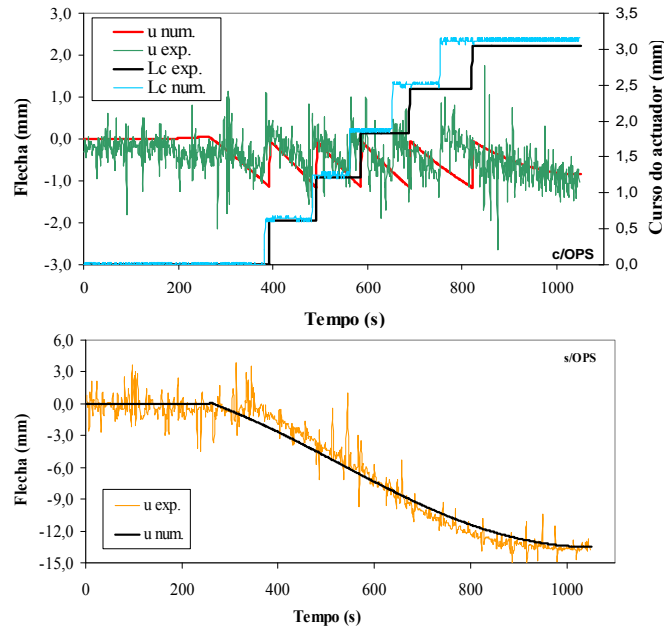


Figura 5: Valores numéricos e experimentais da deformação (u) a meio-vão obtidos para os ensaios 1 (com OPS) e 2 (sem OPS)

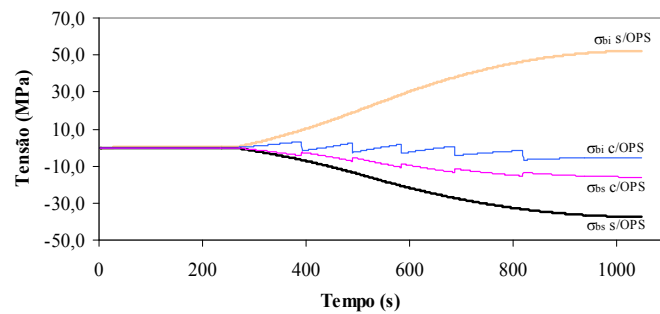


Figura 6: Valores numéricos das tensões ( $\sigma$ ) obtidos dos ensaios 1 (com OPS) e 2 (sem OPS)

- Processo de execução do tipo B

No processo de execução do tipo B, a betonagem é efectuada sequencialmente a partir da extremidade da consola. Realizaram-se os ensaios 3 (com OPS) e 4 (sem OPS). Este último tipo de carregamento é caracterizado pela variação de sinal, ao longo do carregamento, dos esforços e da deformação na secção de controlo.

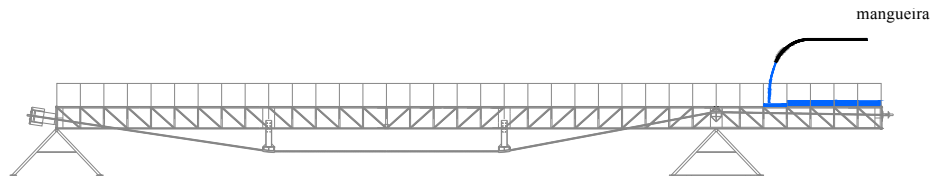


Figura 7: Processo de execução do tipo B – carregamento desde a extremidade da consola

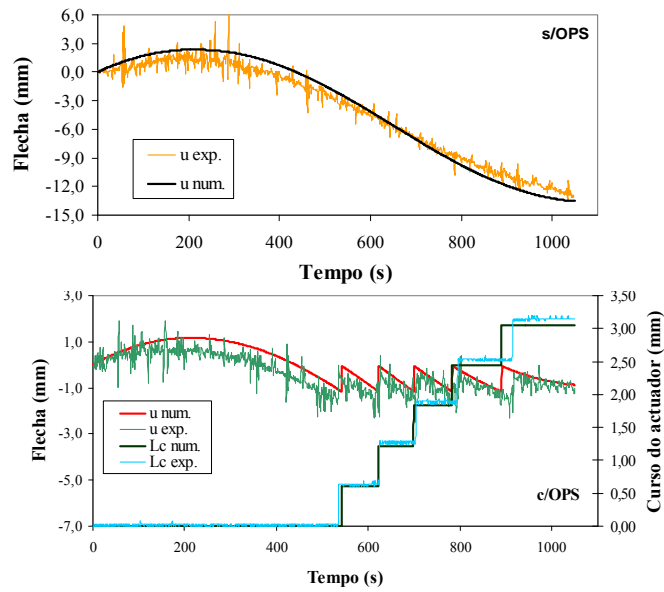


Figura 8: Resultados numéricos e experimentais dos ensaios 3 (com OPS) e 4 (sem OPS)

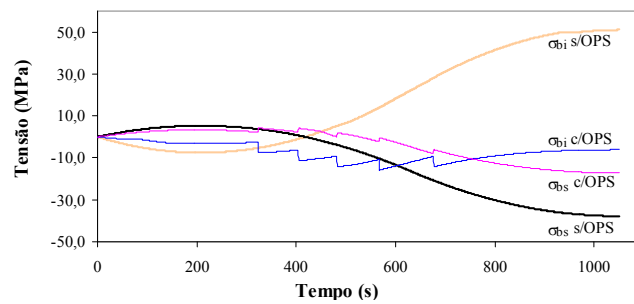


Figura 9: Valores numéricos das tensões ( $\sigma$ ) obtidos dos ensaios 3 (com OPS) e 4 (sem OPS)

### 3.2 Análise dos resultados

A análise das figuras apresentadas permite concluir que o modelo experimental tem um comportamento coerente com o modelo numérico, verificando-se também que o algoritmo de controlo foi executado em conformidade.

As pequenas diferenças observadas entre valores numéricos e experimentais para um mesmo ensaio são justificadas pelas vibrações no modelo experimental, pela diferente velocidade do carregamento e pelo tempo de análise do sistema até à sua actuação. Esses factores são irrelevantes num sistema de controlo estático. Note-se, por exemplo, que as diferenças entre os dois modelos (numérico e experimental) nos ensaios 1 e 3 na avaliação das flechas finais, são, respectivamente, de 3,6% e 6,3%, sendo inferiores nos ensaios 2 e 4.

Na tabela 1 apresentam-se os valores de deformação ( $u$ ) e tensão ( $\sigma$ ) na secção de controlo localizada a meio-vão, e dados referentes ao movimento do êmbolo ( $L_c$ ) do cilindro hidráulico, medidos nos ensaios 1 a 4.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios experimentais e numéricos

Parâmetro	Proc. execução – tipo A				Proc. execução – tipo B			
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.
$u_{\text{máx. posit.}}$ (mm)	0,00	0,25	0,00	1,40	1,16	1,18	2,33	2,65
$u_{\text{máx. negat.}}$ (mm)	-1,15	-1,63	-13,50	-14,10	-1,16	-1,86	-13,64	-13,10
$u_{\text{final}}$ (mm)	-0,84	-0,81	-13,50	-13,72	-1,04	-1,11	-13,64	-13,10
$\sigma_{\text{bs máx.}}$ (MPa)	-15,69	-	-37,46	-	-17,22	-	-37,78	-
$\sigma_{\text{bi máx.}}$ (MPa)	-11,51	-	52,32	-	-15,85	-	51,05	-
$L_c$ máx. (mm)	0,61	0,70	-	-	0,61	0,65	-	-
$L_c$ total (mm)	3,05	3,11	-	-	3,05	3,15	-	-

Refere-se que, entre outros ensaios complementares para aferição dos modelos, foi efectuada uma identificação experimental da frequência natural da estrutura, tendo-se obtido um valor (5,19 Hz) muito próximo do valor determinado no modelo numérico (5,25 Hz).

No que diz respeito à avaliação do desempenho do sistema OPS, os resultados obtidos não podem ser mais do que qualitativos por serem provenientes da avaliação de um modelo reduzido. Em todo o caso, os resultados são claros e a sua interpretação é evidente.

No processo de betonagem do tipo A, o OPS assegura uma redução de 88,2% na deformação final e de 58.1% na tensão condicionante (banzo superior). No processo de betonagem do tipo B, o OPS assegura uma redução de 91.5% na deformação máxima e de 54.4% na tensão condicionante (banzo superior).

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos permitem retirar as seguintes inequívocas ilações do desempenho da aplicação do sistema OPS em cimbres autolanzáveis:

- o sistema OPS assegura um considerável aumento da capacidade de carga dos cimbres;
- o sistema OPS assegura uma drástica redução de flechas.

Por outro lado, a implementação com sucesso do sistema permitiu confirmar que o sistema OPS é exequível e fácil de operar.

#### 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 realizar o estudo científico apresentado, realçando a colaboração dos seus técnicos, em particular o Sr. David Ramos e o Eng.º Rui Campos.

Agradece-se à empresa Martifer por ter executado e oferecido o modelo reduzido, fabricando-o com um rigor notável.

Agradece-se ao Prof. Álvaro Cunha a realização dos ensaios de identificação experimental da frequência do modelo reduzido.

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.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] André *et al* – “Pré-esforço orgânico – estudo sobre uma aplicação de uma nova tecnologia” – V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, Brasil, 2003.
- [2] Pacheco, P. – Tese de doutoramento em engenharia civil “Pré-Esforço Orgânico – Um Exemplo de Sistema Efactor”, Porto, Dezembro, 1999;
- [3] Pacheco, P.; Adão da Fonseca A. – “Organic Prestressing”, em *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, p. 400-405.
- [4] Pacheco *et al* – “Strengthening by organic prestressing of existing launching gantries, in the construction of high speed railway bridge decks” em *Workshop Bridges for High-Speed Railways*, Porto, 2004, p. 289-299.
- [5] Pacheco *et al.* – “Aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres móveis” no *Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista*, Porto, 1997, p. 331-339;
- [6] Oliveira, Teresa – Trabalho final da disciplina de Laboratórios de Automação “Controlo Automático de Pré-esforço Orgânico em Cimbres”, FEUP, 2003, 49 p.