



Encontro
Nacional de
Construção
Metálica
e Mista

PORTO, 20 a 21 de NOVEMBRO de 1997

APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO ORGÂNICO EM CIMBRES MÓVEIS

Pacheco, Pedro Álvares Ribeiro¹; Quinaz, Carlos M.²; Adão da Fonseca, António³

RESUMO

Este trabalho faz uma primeira abordagem sobre o recurso a pré-esforço orgânico em fases construtivas de obras de arte realizadas com cimbres móveis, nomeadamente de viadutos e pontes.

É sinteticamente apresentada a estratégia de control por autocontrol já anteriormente proposta para outras aplicações [6],[7] sendo realçados alguns aspectos particulares no problema em questão.

São feitas considerações sobre pré-esforço em estruturas metálicas, sendo particularizados alguns aspectos específicos a ter em conta no caso de cimbres móveis inferiores autolanzáveis.

É usado um exemplo numérico baseado numa viga de lançamento convencional para demonstrar as potencialidades da aplicação proposta.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas de control em estruturas tem vindo a ser uma área privilegiada de investigação em alguns núcleos sediados em importantes universidades internacionais, sendo já conhecidas algumas aplicações em serviço na área do control dinâmico [1],[2],[3],[4],[11].

Recentemente, foram propostos conceitos que generalizam a aplicabilidade dos sistemas de control em estruturas. O recurso a *para-esforço* (parastressing) [5] ou a aplicação de *sistemas efectores* [6] são conceitos que visam uma nova perspectiva de aplicação de sistemas de control, usando-os como elementos estruturais. Esta evolução representa um salto conceptual significativo, na medida em que o dimensionamento de tais sistemas deixa de ser um procedimento posterior ao dimensionamento da estrutura, e passa a ser um dos passos constituintes desse mesmo processo.

O pré-esforço orgânico é uma aplicação desses conceitos que, recorrendo quase exclusivamente a soluções tecnológicas bem dominadas, concretiza algumas das potencialidades típicas das estruturas orgânicas, ou seja, das estruturas com elementos de comportamento variável.

¹ Eng.º Civil, Estudante de Doutoramento, Depart.º de Eng.ª Civil, Faculdade de Engenharia U.P.

² Eng.º Civil, Professor Adjunto do Instituto Politécnico da Guarda

³ Eng.º Civil, Professor Catedrático, Depart.º de Eng.ª Civil, Faculdade de Engenharia U.P.

Tendo-se reconhecido que a mais valia deste tipo de soluções é potenciada para estruturas com elevadas relações entre as cargas variáveis e as cargas permanentes [8], e sabendo-se igualmente que as condições limitativas do pré-esforço orgânico respeitam a fadiga e a atrasos da resposta, concluiu-se que as vigas de lançamento constituem bons exemplos de aplicação.

Efectivamente, sendo a possibilidade de multi-aplicação de um cimbra móvel limitada pela sua capacidade resistente e pela sua deformabilidade^(*), torna-se particularmente atractivo usar soluções de reforço que possibilitem a sua funcionalidade num maior número de obras.

Como é sabido, o reforço simples das estruturas metálicas que constituem as vigas de lançamento é proporcional ao aumento que se pretende conferir, pelo que tais reforços podem exigir o total redimensionamento das vigas. Por outro lado, o reforço com pré-esforço convencional, apesar de ser uma solução atractiva, é muito condicionado pela capacidade resistente da viga, já que sendo o mesmo dimensionado para suportar uma carga muito superior ao peso da viga, ao ser aplicado, sem que esta esteja em carga, provoca tensões muito elevadas, que poderão implicar a rotura da viga.

Pelo contrário, o reforço com pré-esforço orgânico permite aumentar muito significativamente os níveis de pré-esforço, sem implicar com isso, a cedência da estrutura por este efeito, assegurando que um mesmo cimbra seja passível de ser utilizado numa gama mais ampla de vãos.

Salienta-se que as ampliações de vigas de lançamento pressupõem que, em princípio, as mesmas sejam realizadas por módulos, de modo a facilitar o processo de adaptação. Esta opção de concepção tem vindo, aliás, a ser crescentemente adoptada, por tal motivo.

2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E DO SISTEMA DE CONTROL

Uma estrutura orgânica, no caso do sistema efector ser um sistema de pré-esforço orgânico (OPS), é constituída basicamente por quatro elementos fundamentais: a estrutura base, os sensores, os actuadores e o controlador. No caso de se recorrer a uma estratégia por autocontrol, é dispensado o controlador [6]. Por outro lado, na aplicação em causa, a estrutura base é a viga de lançamento.

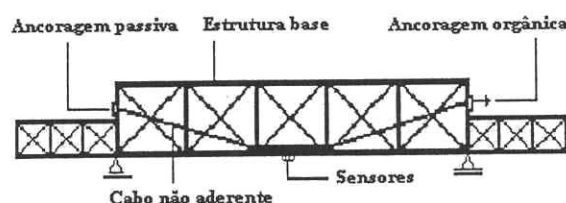


Fig. 1 – Viga de lançamento dotada de um sistema OPS

O funcionamento desta estrutura orgânica perante um carregamento evolutivo é extremamente simples e consiste basicamente em três fases. Numa primeira fase, a viga é colocada na posição pretendida sobre o vão a betonar, podendo nesta fase estar instalada uma parcela mínima do pré-esforço dimensionada para compensar apenas o peso próprio da viga. Numa segunda fase, o sistema é accionado (gerando contracções) sempre que for atingido na

^(*) Os problemas de deformabilidade podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

fibra inferior da secção de control (localizada a meio vão) um determinado nível tensional designado por margem de compressão Δ_c . Nesta fase, o sistema poderá também sofrer descontrações se a viga estiver sujeita a carregamentos variáveis, nomeadamente aqueles que resultam da presença de pessoas ou equipamentos sobre a mesma. Essas ocorrem quando na mesma fibra da secção de control for atingido um limite de compressão designado por margem de actividade Δ_a .

Finalmente, na última fase, após o betão ganhar presa, procede-se à aplicação do pré-esforço do tabuleiro e à desmontagem da cofragem, pelo que o sistema vai gradualmente relaxar através de descontrações que resultam do alívio progressivo da carga.

O circuito de control pode ser representado de acordo com o diagrama da figura 2.

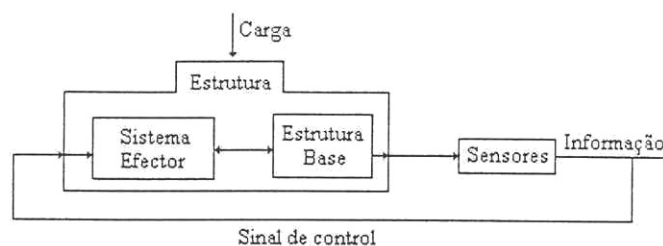


Fig. 2 - Circuito de control de um sistema OPS [6]

A lei de control ou de actividade é definida por uma conjunção de funções binárias, concretizando cada uma o que habitualmente se designa por sistema de control *On-Off*,

$$\begin{cases} \Delta_a < \sigma'_{sc} < \Delta_c & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t \\ \sigma'_{sc} > \Delta_c & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t + 1 \\ \sigma'_{sc} < \Delta_a & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t - 1 \end{cases} \quad (1)$$

em que σ'_{sc} é a tensão na fibra inferior da secção de control no instante t , Δ_c e Δ_a são os já referidos limites operacionais do sistema, e nc_t e $nc_{t+\Delta t}$ são, respectivamente, o número de contrações que o sistema produz até aos instantes t e $t+\Delta t$. Note-se que conforme se pode interpretar de (1), σ'_{sc} é a variável de control ou de estado.

A equação caracterizadora do sistema estático será então a equação que determina em cada instante t o valor assumido pela variável de control:

$$\sigma'_{sc} = \sigma_{sc}(G) + \sigma'_{sc}(Q) + nc_t \times \bar{\sigma}_{sc}^{OPS} \quad (2)$$

onde $\sigma_{sc}(G)$ é a tensão permanente na fibra inferior da secção de control (devida às cargas verticais permanentes e ao pré-esforço permanente), $\sigma'_{sc}(Q)$ a mesma tensão devida à carga

variável Q , e $\bar{\sigma}_{Sc}^{OPS}$ a mesma tensão devida a uma contracção unitária do sistema de pré-esforço orgânico *OPS*.

$$\begin{cases} \Delta_a < \sigma_{Sc}(G) + \sigma'_{Sc}(Q) + k \times \bar{\sigma}_{Sc}^{OPS} < \Delta_c & \Rightarrow nc_{i+\Delta i} = nc_i \\ \sigma_{Sc}(G) + \sigma'_{Sc}(Q) + k \times \bar{\sigma}_{Sc}^{OPS} > \Delta_c & \Rightarrow nc_{i+\Delta i} = nc_i + 1 \\ \sigma_{Sc}(G) + \sigma'_{Sc}(Q) + k \times \bar{\sigma}_{Sc}^{OPS} < \Delta_a & \Rightarrow nc_{i+\Delta i} = nc_i - 1 \end{cases} \quad (3)$$

Esta expressão, usada recursivamente, define o estado de actividade do sistema orgânico ao longo do carregamento evolutivo [6](^{*}).

O cálculo de uma estrutura orgânica com OPS é feito de uma forma análoga à habitual (com estruturas com pré-esforço convencional), mas tendo em conta que o pré-esforço instalado é determinado, em cada fase de actividade, pela respectiva lei de actividade.

3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTRUTURAS METÁLICAS PRÉ-ESFORÇADAS

Com a aplicação do pré-esforço a uma estrutura metálica, pretende-se instalar nas barras um estado de tensão tal que a estrutura passe a suportar um maior carregamento sem que haja necessidade de alterar as dimensões das barras, podendo utilizar-se tanto em estruturas novas como na reabilitação ou reforço de estruturas existentes. Trata-se de um conjunto de forças transmitidas localmente à estrutura nos pontos de ancoragem e de mudança de direcção (selas de desvio), por cabos de aço de alta resistência, tensionados com macacos hidráulicos e que criam esforços de natureza contrária aos provocados pelo carregamento exterior, até ao nível desejado. Desta forma, a utilização do pré-esforço permitirá que sejam eliminadas as tensões indesejáveis a instalar posteriormente na estrutura. A intensidade do pré-esforço neste tipo de estruturas está limitada pela estabilidade das barras sob elevados esforços de compressão provocados pelo pré-esforço.

Tratando-se de uma estrutura a construir de raiz, o pré-esforço é geralmente aplicado em duas fases. A primeira realiza-se em estaleiro e a segunda depois da estrutura ser colocada em obra.

No projecto de sistemas com pré-esforço, a primeira dificuldade surge com a escolha do traçado dos cabos, diferenciando-se traçados rectos ou com configuração poligonal e ainda os que se limitam aos contornos da estrutura e os que os ultrapassam. O traçado deverá ser tal que os seus efeitos influenciem da forma mais favorável a distribuição interna das tensões, sem que a presença dos cabos altere ou ponha em causa a funcionalidade da estrutura.

Os cabos com traçado recto, instalados no interior do contorno e posicionados junto do banzo traccionado, são construtivamente os mais simples, apresentando em geral um alto grau de eficácia. Os esquemas que se evidenciam mais económicos são os que não percorrem a totalidade das zonas traccionadas, mas apenas as zonas de tensões mais elevadas. No entanto, o prolongamento do comprimento teórico óptimo dos cabos pode, em alguns casos, simplificar a construção e montagem da estrutura com um aumento insignificante do consumo de material [9] e [10]. Note-se que a utilização de cabos rectos não é, no entanto, a

(^{*}) Num processo de simulação de um carregamento evolutivo é necessário considerar os atrasos da resposta às condições limite determinadas pelo curso do cilindro [8].

Adaptada para os casos nos quais se pretende contrariar o agravamento significativo de esforços transversos, quer sejam devidos a acréscimos de carga ou a aumentos de vão.

Os cabos com traçado poligonal são mais complicados sob o ponto de vista construtivo, mas são vantajosos na diminuição do esforço transversal. A disposição dos cabos de pré-esforço deve reflectir, na medida do possível, a configuração dos diagramas de momentos flectores provocados pelas solicitações condicionantes, situação que é relativamente simples de garantir em estruturas de betão armado e pré-esforçado mas bastante complexa e eventualmente honorosa em estruturas metálicas. O de traçado dos cabos em estruturas metálicas treliçadas influencia o estado de tensão na totalidade das barras da estrutura, podendo exercer um efeito favorável em certas barras, mas podendo também causar um efeito desfavorável nalgumas outras [9].

As vigas metálicas pré-esforçadas são mais rentáveis quando estas apresentam uma secção assimétrica, conseguindo-se não só um natural aumento do "braço" das forças de pré-esforço como também uma maior robustez do banzo comprimido [9]. Por outro lado, é possível rentabilizar ainda mais o pré-esforço usando traçados que ultrapassem o contorno da estrutura, mas tal solução pode apresentar inconvenientes funcionais, como, por exemplo, dificultar as operações de avanço do cimbra.

4. EXEMPLO NUMÉRICO

Para avaliar a solução proposta, procederam-se a uma série de ensaios numéricos, que permitem objectivar as potencialidades e limitações de soluções alternativas para reforço de uma viga de lançamento existente, com vista à sua possível aplicação em obras com diferentes características.

O modelo base é um cimbra metálico em caixão constituído por duas vigas treliçadas devidamente interligadas. Podem identificar-se na peça três troços, dos quais o intermédio se destina a sustentar as cofragens e o tramo do tabuleiro em execução, sendo os restantes destinados a assegurar a transposição de um tramo para outro. A presente análise irá incidir fundamentalmente sobre o tramo intermédio, já que o mesmo é que condiciona as características fundamentais do cimbra.

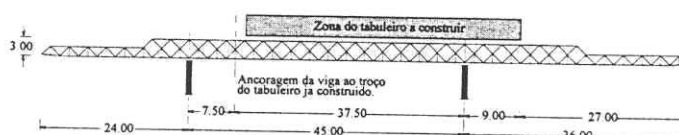


Fig. 3 – Alçado do cimbra móvel base (existente)

Numa primeira fase procurou-se viabilizar a utilização do cimbra base em obras com vãos superiores, recorrendo para isso a reforços com pré-esforço convencional e com pré-esforço orgânico.

Verificou-se, porém, que dadas as características geométricas e mecânicas da estrutura existente, a aplicação de qualquer tipo de pré-esforço com traçados desenvolvidos no interior do contorno da peça não conduz a mais valias com uma expressão significativa.

Contrariamente, usando traçados exteriores ao contorno da peça torna-se viável a aplicação deste cimbra em obras com vãos significativamente maiores. Essa hipótese levanta contudo, significativos problemas de funcionalidade já que, dependendo das características da

obra, nomeadamente da configuração dos pilares, a existência de elementos inferiores ao banzo inferior pode constituir um obstáculo à transposição do cimbra de vão para vão.

No entanto, dada a significativa expressão dos resultados obtidos, e tendo em conta que tal condicionante poderá não ser impeditiva, entende-se que tal solução poderá constituir uma alternativa a considerar.

Posteriormente, e tendo em conta as considerações anteriores, concebeu-se um cimbra com as mesmas características fundamentais do cimbra base, mas no qual se procedeu a uma redistribuição da massa estrutural, assegurando uma maior área do banzo comprimido e afastando o centro de gravidade do centro geométrico da peça.

Conforme se irá verificar, esta solução, quando dotada de um sistema de pré-esforço orgânico, assegura não só a funcionalidade pretendida como também permite alargar significativamente a gama de vãos para os quais o cimbra é utilizável. Naturalmente, este tipo de soluções permite também que os mesmos cimbres sejam utilizados em obras com vãos semelhantes, mas com cargas lineares significativamente mais elevadas.

Note-se que este tipo de aplicação de pré-esforço orgânico é de algum modo uma aplicação faseada de pré-esforço controlada automaticamente.

4.1. Considerações de cálculo

Os modelos estruturais de análise são modelos de elementos finitos de barra, tendo-se considerado as características mecânicas dos vários perfis especificados no projecto do cimbra base, ou, no último caso, os perfis resultantes do redimensionamento.

As cargas consideradas são o peso próprio do cimbra, as cofragens e as sobrecargas de utilização. O pré-esforço é introduzido através de cargas concentradas.

No caso das estruturas com pré-esforço orgânico, sendo necessário definir os carregamentos evolutivos, admite-se que a betonagem é realizada por três mangueiras de betonagem localizadas aleatoriamente em três de cinco sectores de betonagem constituintes do tramo em construção.

Em estado limite último admite-se que as perdas de tensão nos cabos de pré-esforço são recuperadas devido aos acréscimos de tensão consequentes da deformação da viga.

4.2. Soluções com aproveitamento do cimbra existente

Conforme se referiu anteriormente, o traçado dos cabos de pré-esforço nesta situação só melhora o comportamento do cimbra móvel se, conforme se pode observar na figura 4, ultrapassar os contornos da estrutura. O desvio dos cabos na secção de meio vão realizam-se através de perfis em forma de V e que prolongam as diagonais existentes.



Fig. 4 – Configuração tipo do traçado do cabo usando o cimbra existente

Os modelos considerados são semelhantes ao original, sendo acrescentados módulos idênticos ao módulo central do primeiro. Procedeu-se ao respectivo cálculo de modo às tensões máximas serem semelhantes às do modelo base, tendo-se chegado aos valores que constam do seguinte quadro.

	Solução A	Solução B	Solução C	Solução D
Reforço	Nenhum	Pré-Esforço	OPS	OPS
$L_{\max}$ (m)	45	51	57	63
P_{fixo} (kN)	-	1 400	1 600	2 150
P_{OPS} (kN)	-	-	7 200	10 500
ΔF_{OPS} (MPa)	-	-	360	520
$\sigma_{\max}$ (MPa)	192	191	192	202
$\Delta_{\max}$ (cm)	6,4	13,0	1,8	3,3

Quadro 1

onde,

$L_{\max}$ (m) -vão máximo realizável

P_{fixo} (kN) - componente fixa do pré-esforço

P_{OPS} (kN) - componente variável do pré-esforço

ΔF_{OPS} (MPa) – incremento de força por contracção

$\sigma_{\max}$ (cm) -tensão máxima em estado limite último

$\Delta_{\max}$ (cm) -deformação máxima devida à carga (betão +cofragens+sobrecarga de utilização)

Salienta-se que, apesar da expressividade dos resultados, o aproveitamento de cimbres existentes com secções simétricas poderão acarretar dificuldades processuais em obra, que não sendo ultrapassados poderão invalidar o seu potencial interesse.

4.3. Solução com um cembre originalmente dimensionado para ser usado em obras com diferentes vãos

Neste caso encontra-se uma solução inequivocamente vantajosa na medida em que permite que um cembre realizado com o mesmo volume de aço do cembre original seja utilizado em obras com vãos até 57 m.

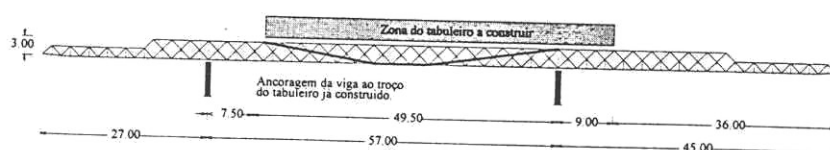


Fig. 5 – Cembre dimensionado para obras de vãos diferentes

O recurso a pré-esforço orgânico garante ao cembre da figura 5, níveis de comportamento semelhantes aos do cembre original, podendo o primeiro ser usado em obras com vãos superiores ao original em mais de 25%.

	Solução C 1
Reforço	OPS
$L_{\max}$ (m)	57
P_{fixo} (kN)	1 600
P_{OPS} (kN)	6 600
Δ_c (MPa)	17
ΔF_{OPS} (MPa)	330
$\sigma_{\max}$ (MPa)	214
$\Delta_{\max}$ (cm)	2,85

Quadro 2

Note-se que seria impossível realizar um cembre com o traçado proposto, com o vão em causa e com pré-esforço convencional na medida em que, conforme já se referiu tal solução conduziria a anti-flexões excessivas na ausência de carga, neste caso seriam provocadas compressões próximas de 600 MPa no banzo inferior.

5. CONCLUSÕES

Em termos comparativos com outras aplicações de pré-esforço orgânico já estudadas, a presente aplicação revela algumas mais valias nomeadamente no que respeita à sua aplicação a curto e a médio prazo: é economicamente atractiva na medida em que permite o recurso a meios que de outra forma seriam eventualmente inutilizados, envolve um grau de risco mais limitado, e é sociologicamente mais aceitável.

A aplicação de qualquer tipo de pré-esforço em cimbres metálicos só é vantajosa se os mesmos forem dimensionados para serem pré-esforçados (ou seja, se não tiverem secções simétricas) ou se os traçados ultrapassarem os seus contornos.

Este estudo permite concluir que a aplicação de sistemas orgânicos em vigas de lançamento dimensionadas para serem pré-esforçadas constitui uma solução atractiva para o multi-aproveitamento das mesmas na construção de obras de arte com vãos ou cargas significativamente diferentes.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Eng.º Armando Rito a disponibilidade oferecida, e de alguma forma a “responsabilidade” que teve no facto de se ter abordado esta aplicação.

Agradece-se ao Eng.º Luis Afonso a disponibilidade oferecida e a oportuna troca de impressões.

REFERÊNCIAS

- [1] Abdel-Rohman M., Leipholz H. H., "Active Control of Flexible Structures", Journal of Eng. Mech. Division, ASCE, Vol. 104, N° St8, pags. 1251-1266, 1977
- [2] Kajima Corporation, "AVS - Active Variable Stiffness System", Seismic Response Control Series, Tokyo, 1990
- [3] López Almansa F., "Contribucion al desarrollo de sistemas de control de estruturas de edificacion mediante cables activos", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, , 1988
- [4] Martin-Sánchez J., Rodellar J., "Adaptative Predictive Control - From the concepts to plant optimization", Prentice Hall, Barcelona, Espanha
- [5] Montens, S. , "A Global Concept for 21st Century Bridges: Parastressing", in "FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures", London, 1996
- [6] Pacheco, P., Adão da Fonseca, A. "Effector Systems in Structures", in "Conceptual Design of Structures" - Proceedings of IASS Symposium, Stutgard, 1996
- [7] Pacheco, P., Adão da Fonseca, A. "Dimensionamento de Estruturas Orgânicas", in "Betão Estrutural 96 - Comunicações do Encontro Bialal do GPPE, Lisboa, p. 1.97-1.108, 1996
- [8] Pacheco, P., Adão da Fonseca, A., "Organically Prestressed Multi-Span Continous Box Girders" - in *New Technologies in Structural Engineering* - Proceedings of IABSE International Conference, Lisboa, págs. 527-534, 1997
- [9] Quinaz, Carlos M., "Estruturas de Aço e Mistas Pré-Esforçadas", Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção de grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil
- [10] Quinaz, Carlos M.; Mota Freitas, J. A., "Estruturas de Aço e Mistas Pré-Esforçadas", Encontro Nacional Betão Estrutural 1994, Porto
- [11] Yang J. N., "Aplication of optimal control theory to civil engineering structures", Journal of Eng. Mech. Div., ASCE, N° EM6, pags. 819-838, 1975