



Pré-esforço orgânico – estudos sobre a aplicação de uma nova tecnologia

António André (1); Pedro Álvares Ribeiro Pacheco (2); António Adão da Fonseca (3)

(1) *Estudante de Mestrado, Departº de Engª Civil, Fac. de Engenharia, Universidade do Porto*
email: antonio_andre@iol.pt

(2) *Professor Auxiliar, Departº de Engª Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto,*
email: ppfeup@fe.up.pt

(3) *Professor Catedrático, Departº de Engª Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto,*
email: adaodafonseca@fe.up.pt

*Dep. Eng. Civil / FEUP
Rua Dr. Roberto Frias 4200-465, Porto, Portugal*

Resumo

O pré-esforço (pós-tensionamento) em estruturas de engenharia civil, hoje amplamente divulgado, consiste na introdução de um conjunto de "acções auto-equilibradas" sobre a estrutura, criteriosamente escolhidas por forma a contrariar tanto quanto possível as acções a que a estrutura estará submetida. Estas "acções auto-equilibradas" não variam com o tipo ou com a intensidade das solicitações exteriores. Mas, a acelerada evolução tecnológica do último quarto do século XX sustenta o desenvolvimento de soluções estruturais com comportamento adaptativo - "estruturas inteligentes". O pré-esforço orgânico, manifestamente enquadrado nesse âmbito, é um sistema de pré-esforço que, recorrendo a uma monitorização "on-line" da estrutura, implementa variações tensionais nos cabos, tornando mais eficiente a acção do pré-esforço.

A base conceptual deste campo de investigação está intrinsecamente ligada às bio-estruturas, mais especificamente, a sistemas biomecânicos com músculos.

Nesta comunicação, apresentam-se primeiro os conceitos fundamentais envolvidos, a descrição de uma metodologia de aplicação e uma referência a vários exemplos estudados. Grande parte destes pontos são traduções parciais de artigos já publicados. Depois, são apresentados elementos sobre um programa experimental presentemente em fase de iniciação. Este programa está a ser desenvolvido em colaboração com uma Empresa de Construção e consiste na realização de ensaios em modelo reduzido de um cimbra auto-lançável dotado de um sistema de pré-esforço orgânico.

1. Introdução

Alguns anos antes do desenvolvimento dos Sistemas de Controlo Activo na Engenharia Civil, o “criador” do Pré-esforço – Eugéne Freyssinet - e, uns anos mais tarde, Zetlin, fizeram menção a cabos activos para melhorar o comportamento de estruturas. Estava-se em meados do século XX e, portanto, o contexto tecnológico da época não terá convidado, ao que se sabe, a grandes desenvolvimentos dessas ideias, e muito menos a aplicações práticas.

Mas alguns anos mais tarde, os excelentes resultados dos Sistemas de Controlo na Engenharia Industrial e noutras áreas precipitaram o desenvolvimento desse campo de investigação na área da Engenharia Civil. Desde então, vários núcleos de investigação têm empenhado significativos esforços nesta matéria, nomeadamente na Universidade George Washington, na Universidade de Buffalo e na Universidade Técnica da Catalunha, para além de terem aparecido vários trabalhos individuais cuja contribuição para esta matéria não pode ser de algum modo desprezada, como os de Zuk, de Yao e de outros. As aplicações que têm sido desenvolvidas são claramente vocacionadas para o controlo dinâmico de estruturas.

Recentemente, foram propostos conceitos que generalizam a aplicabilidade dos sistemas de controlo em estruturas. O recurso a *para-esforço* (“parastressing”) MONTENS (1996) ou a aplicação de *sistemas efectores* PACHECO et al. (1996) são conceitos que visam uma nova perspectiva de aplicação de sistemas de controlo, 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, passando a ser um dos passos constituintes desse mesmo processo.

O pré-esforço orgânico, que é um exemplo de sistema efector PACHECO et al. (1996 e 2002b), é uma aplicação conjunta de soluções tecnológicas bem conhecidas em que são necessárias algumas adaptações.

Os macacos hidráulicos ficam permanentemente instalados entre as ancoragens e a estrutura, permitindo assim o tensionamento dos cabos sempre que em determinadas secções de controlo forem atingidos determinados estados de tensão. O algoritmo desenvolvido é particularmente simples, sendo já conhecidas técnicas matemáticas para identificar os inerentes problemas de controlo.

As análises numéricas já realizadas conduziram a uma série de conclusões, das quais se destaca uma: em estruturas sujeitas a cargas variáveis com uma importância relativa elevada, o pré-esforço orgânico pode constituir uma solução francamente 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.

Foram estudadas, com diferente grau de profundidade, várias aplicações, desde o recurso a pré-esforço orgânico em pontes e viadutos à aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres auto-portantes, passando por outros exemplos não menos relevantes, como reservatórios e silos, lajes de edifícios altos, pontes levadiças e reabilitação de pontes.

Em certos casos, os ensaios numéricos permitem objectivar que o pré-esforço orgânico viabiliza reduções de rigidez de cerca de 30% relativamente a soluções convencionais. Um passo essencial no dimensionamento consiste na decisão de compromisso entre a rigidez e a potência do sistema de tensionamento, reconhecendo-se a vantagem inequívoca que a potência não implica peso da estrutura.

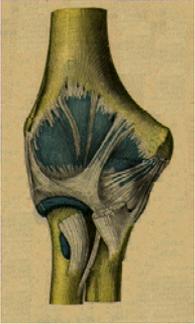
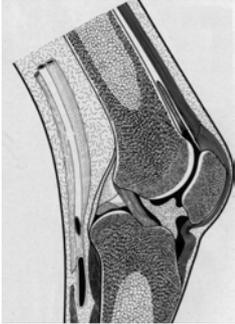
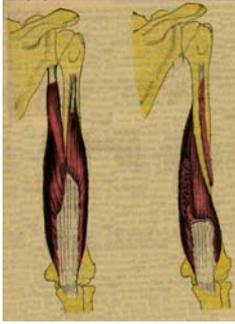
Actualmente está em curso um programa experimental que visa comprovar a viabilidade e as vantagens da aplicação desta técnica a cimbres auto-lancáveis usados na construção de pontes e viadutos.

Depois da apresentação dos conceitos fundamentais envolvidos, é feita uma descrição dos trabalhos iniciais do programa experimental.

2. Base conceptual – As bio-estruturas

O mundo das bio-estruturas tem uma imensa variedade de soluções estruturais. Algumas são simples e outras são muito sofisticadas. Todas permitem fecundos trabalhos de pesquisa, sendo certo que os engenheiros estruturais encontram na Natureza várias soluções bem conhecidas. Em todo o caso, a realização de alguns cálculos simples torna claro que os “critérios de dimensionamento” das bio-estruturas são significativamente diferentes dos que são usados na Engenharia Civil. Como é óbvio, a capacidade de “auto-reparação” das estruturas vivas é uma razão mestra para tal distinção, mas não é a única.

No quadro 1 são apresentados quatro elementos bio-estruturais muito semelhantes a certos elementos estruturais bem conhecidos. Até agora, desconhece-se que tenha sido concebido qualquer elemento na Engenharia Estrutural com a função do músculo. De facto existem certos atributos de alguns sistemas de controlo activo que os relacionam com músculos, mas uma diferença fundamental é a dos músculos serem, eles próprios, elementos estruturais PACHECO (2002b).

				
OSSOS	LIGAMENTOS	CARTILAGEM ARTICULAR	TENDÕES	MUSCÚLOS
ESCORAS, TIRANTES, VIGAS, PILARES E CASCAS	CONECTORES	APARELHOS DE APOIO	TIRANTES E CABOS	SISTEMAS EFECTORES

Quadro 1 – Principais elementos estruturais nas bio-estruturas animais BOMBARDELLI (1982); D’ARCY THOMPSON (1917); TESTUT (1947); PACHECO (1999).

Um músculo é um elemento estrutural com rigidez variável. A variação de rigidez é conseguida através do fornecimento de energia. Assim sendo, um músculo – ou um sistema efector – pode ser tomado como um elemento estrutural que transforma energia em rigidez, ou seja, um músculo é uma mola de rigidez variável.

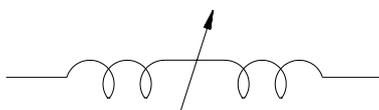
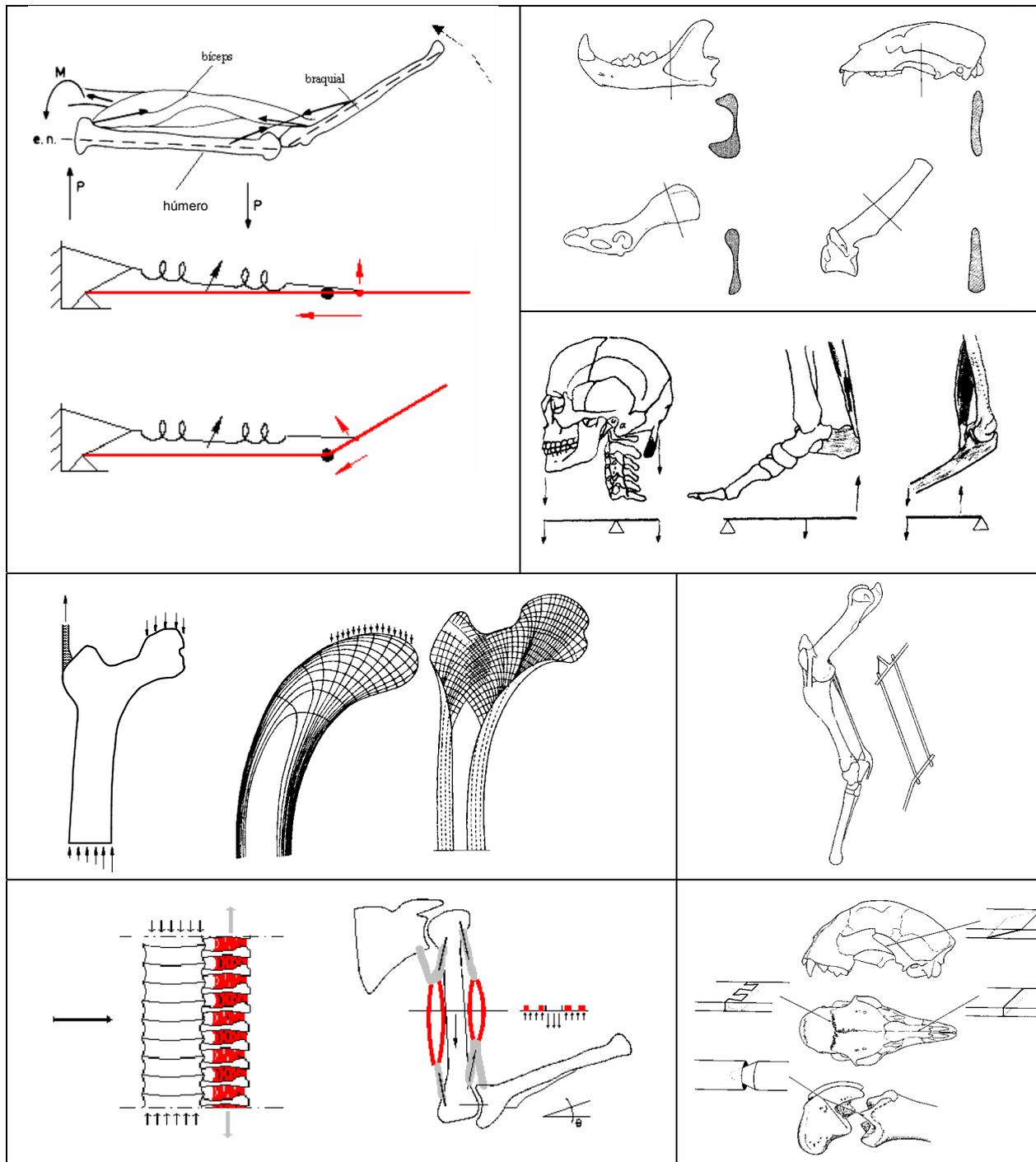


Figura 1 – Representação de sistema efector – mola de rigidez variável

Desde o início do século XX, investigadores de diferentes áreas tem vindo a identificar diversos sistemas estruturais e respectivas funcionalidades em bio-estruturas MCNEILL (1968), BOMBARDELLI (1982), D'ARCY THOMPSON (1917), FUNG (1981), SOONG (1990), TESTUT (1947), PACHECO (2002b).



Quadro 2 – Exemplos de sistemas estruturais em bio-estruturas

No quadro 2 são apresentados conjuntamente exemplos de sistemas estruturais clássicos e outros sistemas mais complexos onde se identificam as funções estruturais de músculos.

As contribuições de D'Arcy Thompson e de Hildebrand merecem uma distinção especial, mas a contribuição de engenheiros estruturais será fundamental para que se possam aprofundar os conhecimentos dessa específica área de conhecimento.

Muitas ilações podem ser tiradas destas extraordinárias soluções estruturais. Por exemplo, os músculos evitam as tensões indesejáveis que o pré-esforço convencional implica. O pré-esforço dos músculos é mais eficiente por ser variável, actuando apenas quando necessário.

3. Sistemas efectores

Quase como regra absoluta, os materiais de construção são considerados estáveis, com propriedades constantes. A sensibilidade perante alterações do ambiente é tida como indesejável e as alterações de comportamento são tratadas como acções externas PACHECO (1996).

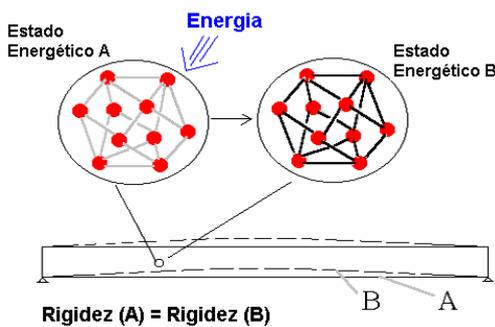


Figura 2 – Mudança de rigidez por indução de energia

No entanto, algumas variações que envolvem transferências energéticas podem ser tratadas de outra forma. Aliás, como o módulo de elasticidade depende do estado energético, a modificação ou controlo desse estado implica a modificação ou controlo da referida propriedade mecânica.

Esta ideia conduz a duas questões triviais: como é que isso pode ser realizado e que vantagens é que se podem tirar disso ?

No caso dos materiais “sensíveis” ou “adaptativos”, isso pode ser conseguido com indução directa SOONG (1990). Noutros casos, para realizar

indução directa ou indirecta de energia são necessários “transformadores de energia”. Esses “transformadores de energia” não são mais do que mecanismos que usam outros tipos de energia para induzir energia elástica numa estrutura. Os macacos hidráulicos e os electroímans são exemplos correntes.

A melhor resposta à segunda questão está na Natureza.

Os músculos são elementos estruturais cujas unidades microscópicas são os sarcómeros. Estas unidades são constituídas por duas proteínas: a actina e a miosina.

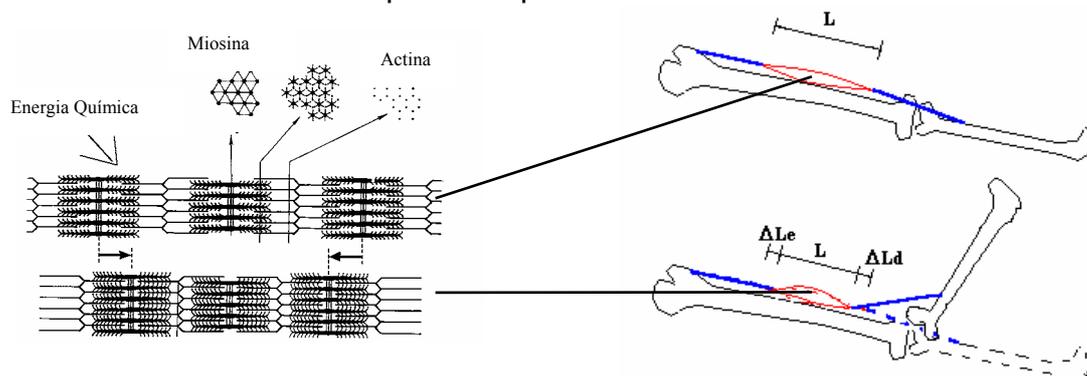


Figura 3 – Variação de rigidez nos músculos

Quando é tomada a “decisão” de se proceder a uma contracção, é efectuada uma indução de energia química que promove o movimento relativo entre a actina e a miosina, o que altera a configuração do respectivo sarcómero. Este processo altera o módulo de elasticidade do músculo e altera também o estado de tensão do sistema estrutural onde o músculo se insere.

Este “sistema effector” da Natureza evita, ou minimiza, tensões nocivas nos ossos, melhorando assim o desempenho estrutural da estrutura biomecânica.

Um sistema efector ou “músculo artificial” é um elemento estrutural com a capacidade de modificar a rigidez de uma estrutura (por indução de energia) melhorando o seu desempenho, tipicamente durante a acção de certo tipo de solicitações.

Uma possível resposta à primeira questão é dada pelo pré-esforço orgânico (OPS).

4. Pré-esforço orgânico

O pré-esforço orgânico é um sistema de pré-esforço auto-ajustável que utiliza também uma tecnologia bem conhecida. Os elementos fundamentais são as ancoragens orgânicas, os cabos de pré-esforço e o circuito electrónico. Todos esses componentes são frequentemente utilizados com resultados fiáveis. Naturalmente, os cabos de pré-esforço são não aderentes.

O dimensionamento e as tecnologias construtivas são semelhantes às que são habituais em estruturas com pós-tensão constante com cabos não aderentes, sendo o circuito electrónico, incluindo cabos eléctricos e componentes electrónicos, muito semelhante aos de circuitos de sistemas de controlo activo comuns SOONG (1990).

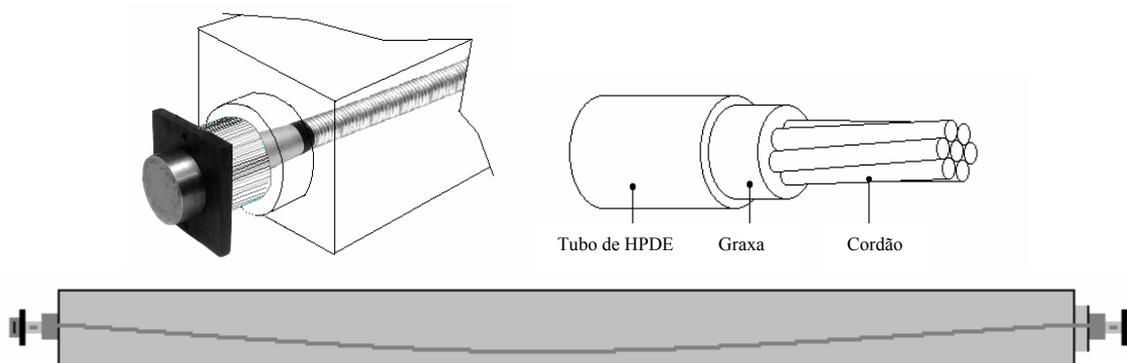


Figura 4 – Ancoragem orgânica, cabo não aderente e inserção do sistema numa viga simplesmente apoiada

As ancoragens orgânicas são ancoragens com os sistemas servo-hidráulicos incorporados, ou seja, os macacos ficam instalados entre as ancoragens e as estruturas. A estratégia de controlo é muito simples PACHECO et al. (1996, 1997a, 1999). Trata-se de um algoritmo muito semelhante ao clássico “on-off”. Basicamente, se na secção de controlo a compressão é reduzida, o sistema OPS produz “contrações” (as forças de pré-esforço são ampliadas); contrariamente, se as compressões são elevadas, o sistema OPS produz “descontrações” (as forças de pré-esforço são reduzidas). Esse algoritmo tem a seguinte tradução matemática (1):

$$\begin{cases} \Delta_{ai} < \sigma_{Sci}(G) + \sigma_{Sci}^t(Q) + nc_t \times \bar{\sigma}_{Sci}^{OPS} < \Delta_{ci} & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t \\ \sigma_{Sci}(G) + \sigma_{Sci}^t(Q) + nc_t \times \bar{\sigma}_{Sci}^{OPS} > \Delta_{ci} & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t + 1 \\ \sigma_{Sci}(G) + \sigma_{Sci}^t(Q) + nc_t \times \bar{\sigma}_{Sci}^{OPS} < \Delta_{ai} & \Rightarrow nc_{t+\Delta t} = nc_t - 1 \end{cases} \quad (1)$$

onde,

$\sigma_{Sci}(G)$ é a tensão na fibra relevante da secção de controlo i devido à carga permanente;

$\sigma_{Sci}^t(Q)$ é a tensão na fibra relevante da secção de controlo i devido à carga variável no instante t ;

$\bar{\sigma}_{Sci}^{OPS}$ é o incremento de tensão na fibra relevante da secção de controlo i produzido pelo sistema OPS numa contração;

nc_t e $nc_{t+\Delta t}$ são um número de contrações activas nos instantes t e $t+\Delta t$.

$$nc_i \times \bar{\sigma}_{Sei}^{OPS}$$

é a tensão na fibra relevante da secção de controlo i devido à acção do sistema OPS no instante t ;

$$\Delta_{ci} \text{ e } \Delta_{ai}$$

São as margens de compressão e de actividade do sistema orgânico (são os níveis de tensão para os quais os sensores são programados para emitirem sinais de actividade).

A generalização deste algoritmo para vigas contínuas é estabelecida de forma semelhante. O atraso da resposta (tanto mecânico como electrónico), da mesma forma que a consideração de diferentes tipos de carregamentos, pode ser facilmente integrada nesta metodologia sem alterar os procedimentos lógicos fundamentais implícitos nas expressões matemáticas. Isso é explicado em detalhe em PACHECO (1999).

A análise numérica envolve uma série de procedimentos:

- cálculo das perdas de pré-esforço atendendo às condições particulares do pré-esforço orgânico;
- definição de carregamentos evolutivos cujos efeitos sejam pelo menos equivalentes aos que são definidos nos regulamentos ou noutros documentos normativos de projecto;
- análise de problemas de controlo específicos desta aplicação através de modelos matemáticos adequados;
- análise de incertezas;
- verificação da segurança da resistência à fadiga (incluindo fadiga por desgaste mecânico);
- verificação da segurança para os vários estados limites (procedimentos convencionais);
- análise dinâmica, incluindo a análise dinâmica dos efeitos provocados pela acção de controlo;
- definição de procedimentos para assegurar a fiabilidade do sistema em projecto e construção (unidades de fornecimento de energia de emergência, sistemas de segurança redundantes; etc.)

Esses procedimentos foram já estudados PACHECO et al. (1996,1997a,1997b,1999, 2002a), mas é fundamental comprová-los através da análise experimental.

O efeito do controlo produzido pelo sistema OPS pode ser compreendido na figura 5, a qual se refere a um caso de carga com cargas rolantes no primeiro exemplo apresentado no ponto 5, onde 8 sistemas OPS estão implementados (dois em cada vão intermédio e um em cada vão extremo).

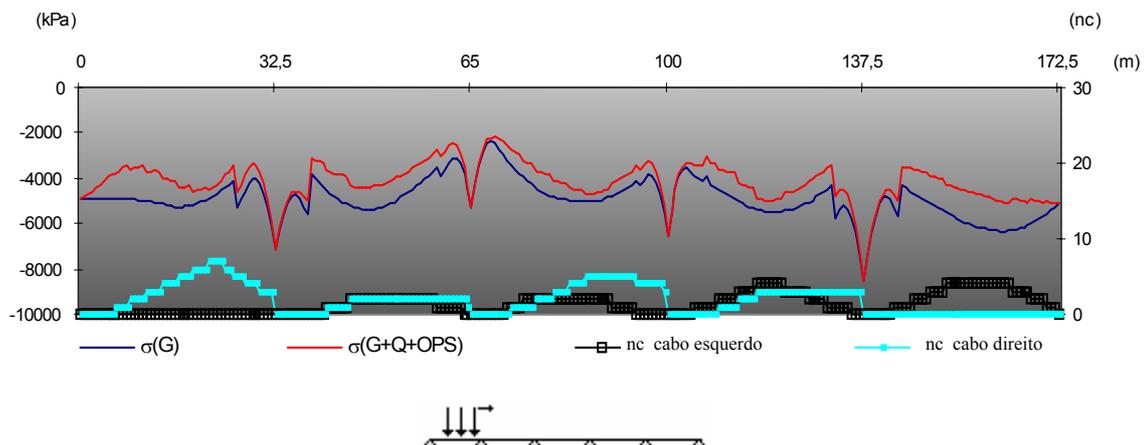


Figura 5 – Tensões nas fibras inferiores e “contrações” dos cabos num viaduto de 5 vãos sujeito à passagem de um veículo tipo com três eixos PACHECO et al. (2002b)

Uma das mais relevantes virtudes do sistema OPS reside no facto das perdas de pré-esforço serem muitíssimo reduzidas. Uma vez que os macacos hidráulicos estão incorporados na estrutura, estes podem compensar todas as perdas instantâneas, excepto as perdas por atrito (que são forçosamente baixas por se tratarem de cabos não aderentes). Por outro lado, apenas ocorrem perdas diferidas na componente fixa do pré-esforço orgânico, que, de qualquer modo, podem também ser parcialmente

compensadas. No exemplo da figura 5, a diferença de perdas de pré-esforço em duas soluções distintas, uma com OPS e outra sem OPS, é notória.

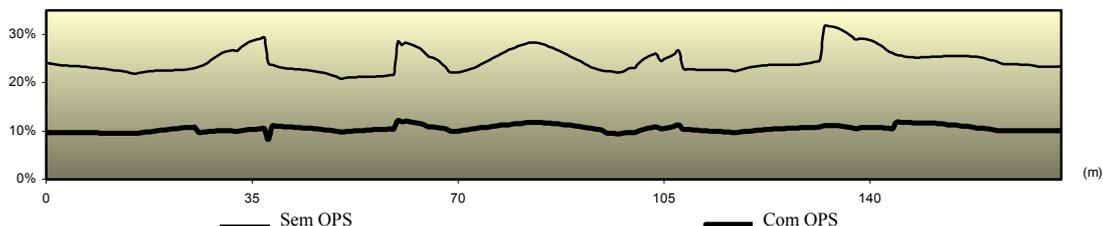


Figura 6 – Perdas de pré-esforço

Um outro aspecto fundamental do OPS está relacionado com a secção transversal dos elementos estruturais. Numa estrutura convencional, o valor da força de pré-esforço tem que estar dentro de um determinado intervalo para cumprir os valores limites das tensões instaladas, definidos pelas especificações de projecto. Um intervalo insuficiente implica um aumento da secção transversal, ou uma nova concepção da estrutura. Essa situação, que é relativamente comum no dimensionamento de estruturas com pré-esforço convencional, não existe (ou é drasticamente reduzida) com pré-esforço orgânico, pois neste as forças de pré-esforço nunca são “elevadas de mais”.

No estado actual de conhecimento, pode estabelecer-se o seguinte balanço de benefícios/dificuldades (para aceder a informação mais detalhada consultar (i) PACHECO et al. (1996); (ii) PACHECO et al. (1997a); (iii) PACHECO (1999); (iv) PACHECO et al. (2002a), (v) Pacheco et al. (2003):

Vantagens do OPS:

- 50% redução das perdas de pré-esforço^{(i),(ii),(iii)};
- Para carregamentos lentos – até 70% de redução de rigidez^{(i),(ii),(iii)};
- Para carregamentos lentos – até 30% de redução de massa estrutural^{(i),(ii),(iii)};
- Tensões permanentes reduzidas⁽ⁱⁱⁱ⁾;
- Deformações reduzidas⁽ⁱⁱⁱ⁾;
- Redução da fluência⁽ⁱⁱⁱ⁾;

Matérias que requerem cuidados especiais:

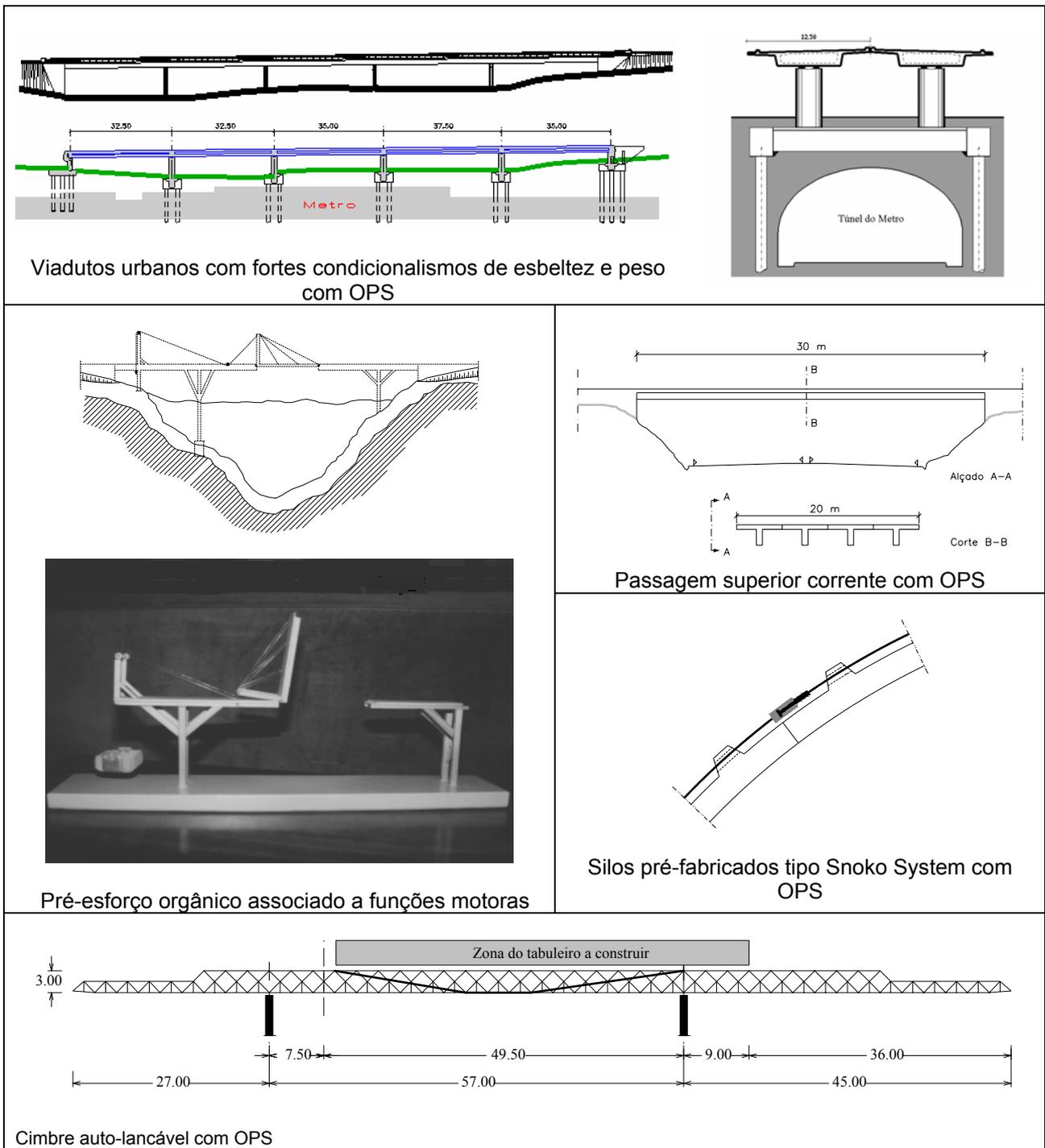
- Fadiga⁽ⁱⁱ⁾;
- Efeitos dinâmicos^(v);
- Custo (bombas potentes para carregamentos rápidos)⁽ⁱⁱⁱ⁾;
- Hiperactividade (sistema de controlo)^(iv);
- Instabilidade (sistema de controlo)^(iv);
- Fiabilidade^(iv).

São já conhecidos os procedimentos consistentes para ultrapassar as referidas dificuldades, mas para a metodologia proposta, aplicações com carregamentos condicionantes rápidos implicam bombas potentes e implicam problemas dinâmicos. Obviamente, no actual estado de conhecimento, e antes de mais desenvolvimentos, esse aspecto deve ser ponderado, pelo que nos próximos passos desta pesquisa serão preferencialmente consideradas estruturas sujeitas a carregamentos condicionantes lentos.

5. Exemplos

Têm sido estudados vários exemplos de aplicação. Em alguns casos, usando apenas a tecnologia já bem dominada e apesar das evidentes vantagens estruturais, reconhecem-se as dificuldades referidas anteriormente. Noutros casos, existem fortes razões para se desenvolverem as respectivas aplicações. Tipicamente os melhores resultados estão

associados a estruturas sujeitas a carregamentos lentos e com elevadas razões carga variável / carga permanente PACHECO et al. (1997b, 2002b).



Quadro 3 – Aplicações com pré-esforço orgânico

No actual contexto tecnológico, acredita-se que uma das aplicações com maiores potencialidades é a aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres auto-lancáveis.

6. Actual pesquisa – cimbres com pré-esforço orgânico – análise experimental

6.1. Objectivo dos ensaios

Os primeiros estudos experimentais de estruturas com pré-esforço orgânico (OPS) visam a sua aplicação a cimbres auto-lançáveis. Pretende-se avaliar o aumento da capacidade de carga do cembre sob a acção de um carregamento evolutivo que simula a betonagem de um tramo de um tabuleiro de uma ponte (ou de um viaduto), bem como a respectiva redução de deformações e controlo de tensões geradas quando o sistema OPS é utilizado.

6.2. Breve descrição

A importância do custo de mobilização dum cembre auto-lançável no preço global duma obra é muito significativo, tornando-se por isso particularmente atractiva a possibilidade de aumentar a reutilização deste tipo de estruturas provisórias em obras com diferentes vãos e/ou diferentes secções transversais. Efectivamente, os cimbres já são alvo de reutilizações, mas isso pressupõe, geralmente, o respectivo redimensionamento e reforço atendendo às características e vãos do tabuleiro a que darão suporte. De acordo com dados da indústria, em casos correntes este reforço pode significar valores entre 10 a 25% do valor inicial do cembre.

Assim sendo, uma vez comprovados os resultados numéricos que a seguir se apresentam, reconhecer-se-á a existência de um enorme potencial de aplicação na indústria de construção de viadutos e pontes.

Naturalmente, para que esta solução possa ser explorada na sua máxima rentabilidade, os cimbres deverão ser concebidos especialmente para o efeito, tanto na definição da secção transversal (os banzos comprimidos pelo pré-esforço deverão ser mais robustos) como na definição da constituição longitudinal (a estrutura deverá ser modular, de forma a poder variar-se facilmente o comprimento do cembre).

Porquê aplicar pré-esforço orgânico e não simplesmente pré-esforço convencional?

O grande condicionalismo da aplicação do pré-esforço convencional em estruturas metálicas é o baixo peso próprio que impossibilita a aplicação de uma só vez de todo o pré-esforço necessário para a situação de carregamento máximo. Em situação de ausência ou de carregamento moderado, corre-se o risco de introduzir contra-flechas elevadíssimas e criar problemas de instabilidade, associados a tensões de compressão elevadas em “banzos” dimensionados para tensões de tracção. Ou seja, o cembre pode “quebrar ao contrário”.

6.3. Descrição do modelo experimental

Os ensaios que estão numa fase de preparação no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, irão constituir o elo de ligação entre as simulações numéricas e futuras aplicações em obra. Para tal será utilizado um cembre em caixão treliçado com 14 m de comprimento e com uma secção transversal de $0.40 \times 0.40 \text{ m}^2$ (ver figura 8), constituído por elementos extremamente esbeltos soldados entre si (ver figura 9). O cembre é apoiado em suportes metálicos que serão fixados na laje de reacção do Laboratório. O cembre, de comprimento total L , vence um vão de $4/5L$ com a restante parte ($L/5$) em consola. Desta forma simula-se o funcionamento dum cembre auto-lançável superior apoiado na extremidade da consola já executada e no pilar seguinte, ficando em consola $1/5$ do vão seguinte (ver figura 7).



Figura 7 – Cimbre auto-lançável superior em deslocação para uma nova posição

O pré-esforço é materializado por dois monocordões exteriores ao cimbre, e é aplicado com recurso a um macaco hidráulico de alta precisão, dimensionado para o efeito, ligado a um grupo bomba-hidráulica que, por sua vez, é controlado por um sistema de aquisição de dados (SAD). O macaco está localizado entre uma placa de reacção soldada no topo do cimbre e uma peça metálica preparada para receber a “cabeça” do macaco, onde se inserem duas ancoragens passivas. O pré-esforço é realizado por aumento do afastamento dessa peça relativamente ao cimbre (por acção do macaco). Na outra extremidade existem outras duas ancoragens passivas executadas num perfil reconstituído.

A betonagem é simulada através de um carregamento com água que de uma forma simples, realiza os ciclos de carga e descarga do cimbre. Para que a simulação seja o mais realista possível, foi concebida uma cofragem que permite simular as diferenças de viscosidade e fluidez entre a água e o betão. Para tal, em vez de uma única cofragem (onde a água poder-se-ia movimentar livremente), “compartimentou-se” a cofragem em 35 caixas metálicas com dimensões de $0.4 \times 0.4 \times 0.5 \text{ m}^3$, apoiadas nos nós da treliça, os quais estão afastados de 0.4m.

O controlo do pré-esforço orgânico é feito por via da tensão instalada numa secção de controlo localizada aproximadamente a meio vão de $4/5xL$, com extensómetros e LVDT's. A informação recolhida é recebida e tratada no SAD, que, de acordo com o algoritmo anteriormente exposto (1) dá instruções que fazem variar a intensidade do pré-esforço. Está prevista a instrumentação de outras secções transversais, o que servirá para leitura de dados e será útil para proceder à calibração do modelo experimental.

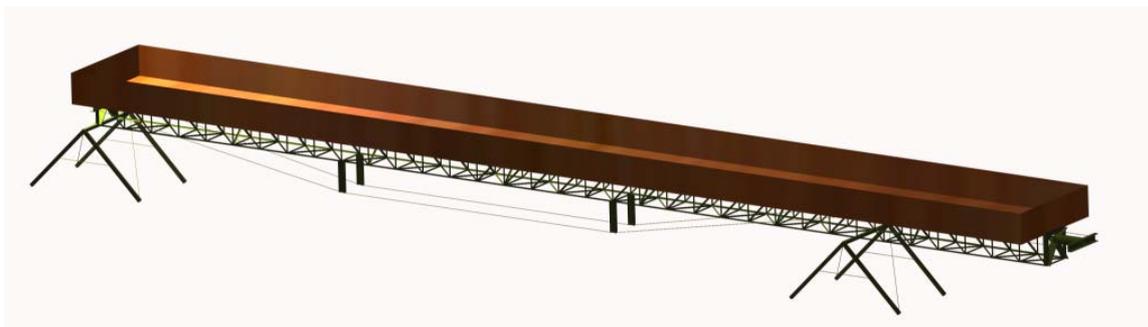


Figura 8 – Perspectiva do modelo experimental

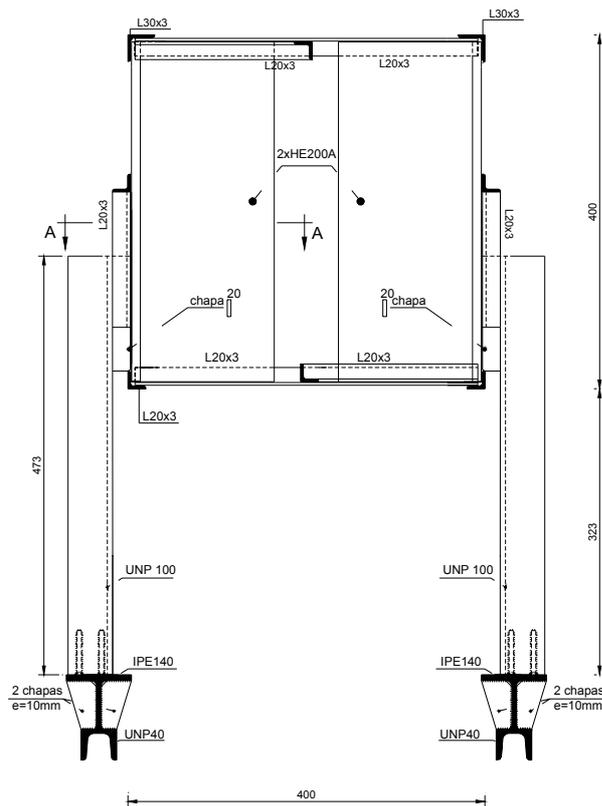


Figura 10 – Secção com sela de desvio para momentos positivos

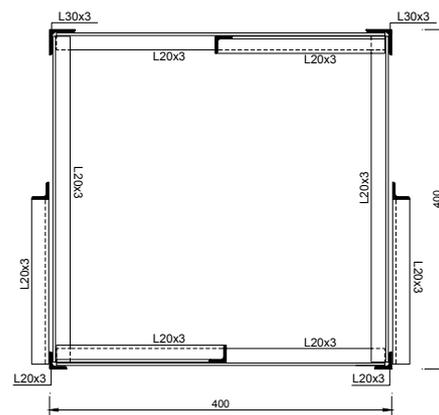


Figura 9 – Secção tipo do cimbre

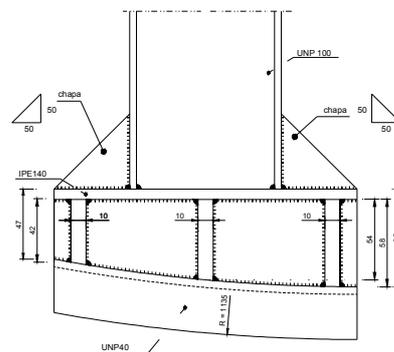


Figura 11 - Pormenor da sela de desvio

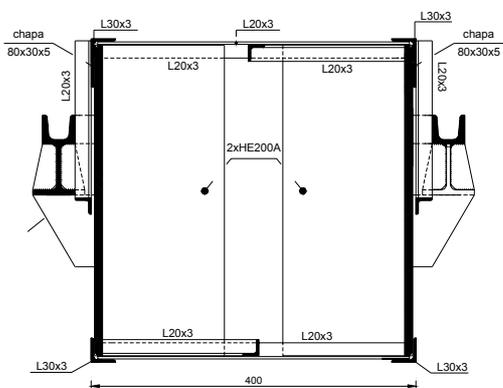


Figura 12 – Secção com sela de desvio para momentos negativos

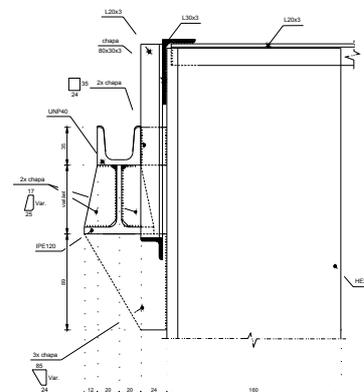


Figura 13 – Pormenor da sela de desvio

6.4. Resultados numéricos

Os primeiros ensaios numéricos servem para aferição do algoritmo de controlo, e são efectuados com um carregamento uniforme crescente e simultâneo em todas as caixas.

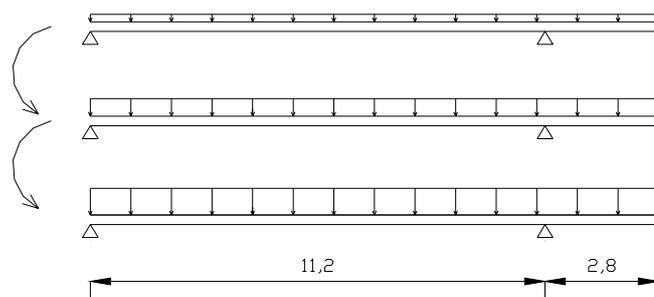


Figura 14 – Evolução do carregamento nos ensaios numéricos preliminares

Os resultados obtidos mostram que, para um mesmo limite de tensões, o cimbra com pré-esforço orgânico (OPS) resiste sensivelmente ao dobro da carga.

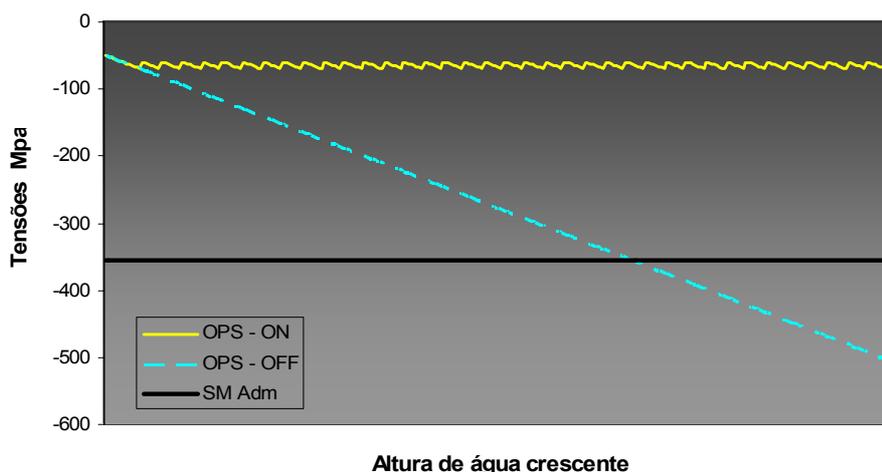


Figura 15 – Evolução das tensões de tracção na secção de controlo (banzo traccionado)

Nas figuras 15 e 16 é possível observar a evolução das tensões com e sem a actuação do OPS, nas barras da secção de controlo. Na figura 15 observa-se que, para as barras traccionadas, o carregamento pode ser infinito desde que o OPS esteja em funcionamento. Na figura 16, relativa às barras comprimidas da mesma secção, é visível que o efeito do OPS, embora retarde o acréscimo de tensões, não evita que se atinjam os limites definidos. Neste caso, primeiro estabeleceu-se em $\sigma_{adm} = 165$ MPa a tensão máxima admissível com interacção de esforços (N,M,V), mas decidiu-se impor uma segurança adicional ao baixar aquela tensão para 110 MPa. Esta margem de segurança suplementar pretende ter em conta as maiores imperfeições geométricas relativas existentes nos perfis de menor dimensão, utilizados neste modelo reduzido laboratorial.

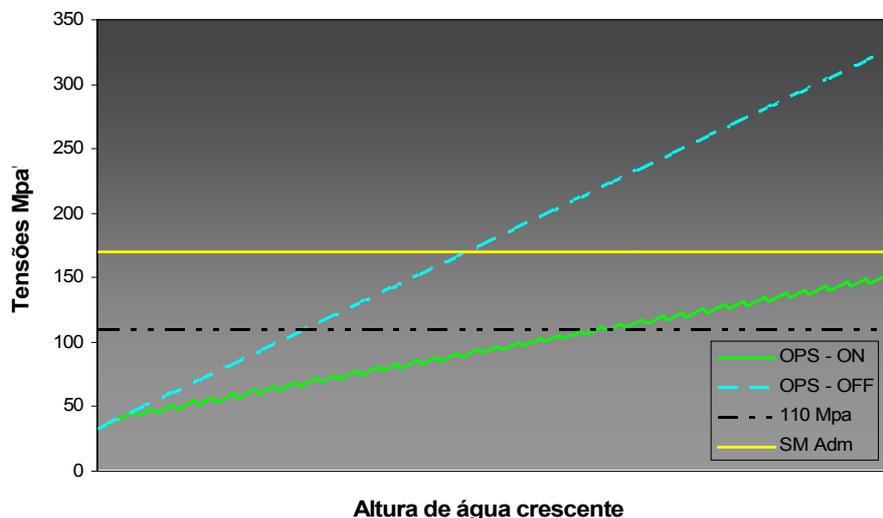


Figura 16 – Evolução das tensões de compressão na secção de controlo (banzo comprimido)

Salienta-se que a secção de controlo está condicionada pelo seu banzo comprimido (figura 16).

Seguidamente apresenta-se a simulação numérica de um carregamento vertical e horizontalmente evolutivo, iniciado na consola. Este carregamento simula uma forma de betonagem correntemente adoptada na construção de pontes e viadutos.

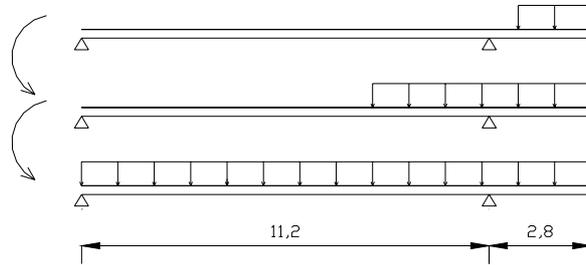


Figura 17 – Evolução do carregamento nos ensaios numéricos

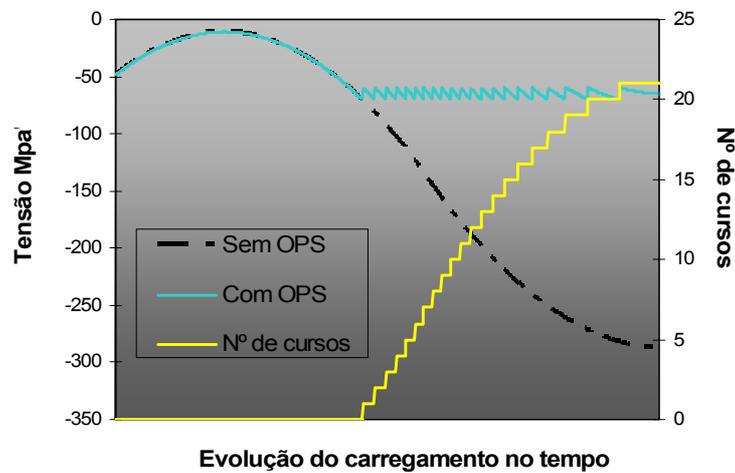


Figura 18 – Evolução das tensões de tracção na secção de controlo (banzo traccionado)

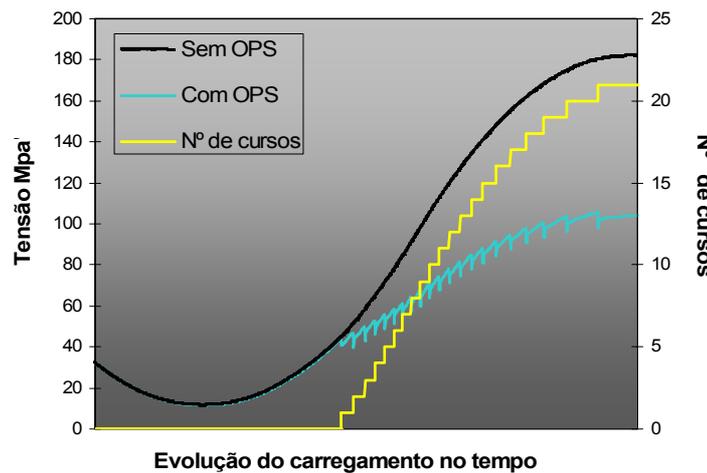


Figura 19– Evolução das tensões de compressão na secção de controlo (banzo comprimido)

Para este carregamento, verifica-se que com a aplicação do pré-esforço orgânico é alcançado um aumento da capacidade de carga do cimbre de aproximadamente 60%.

No que respeita a deformações, os resultados ainda são mais expressivos. Para um mesmo carregamento (correspondente a 45% do carregamento admissível no cimbres sem OPS), os incrementos de flechas durante o carregamento, com e sem sistema OPS, são, respectivamente, de 0.22 e 1.84 cm. Ou seja, no modelo laboratorial, espera-se que o sistema OPS assegure uma redução de 88% na máxima flecha “em serviço”.

7. Conclusões

A implementação de soluções estruturais da Natureza em problemas da Engenharia é um campo de pesquisa de enorme fecundidade. A alteração da rigidez através da indução de energia é uma matéria de estudo numa fase ainda embrionária, mas reconhece-se que o conceito de sistema efector (ou músculo artificial) abre novas fronteiras à concepção de estruturas.

O Pré-esforço orgânico é um exemplo que exhibe potencialidades significativas, especialmente se a esbeltez e a leveza forem aspectos particularmente relevantes. A vertente teórica do pré-esforço orgânico já está desenvolvida, verificando-se que os resultados numéricos sustentam as referidas potencialidades. A grande redução de compressões permanentes e de perdas de pré-esforço permitem uma utilização mais racional do pré-esforço.

Em estruturas com uma elevada razão cargas variáveis / cargas permanentes, e com carregamentos lentos, o pré-esforço orgânico pode constituir uma solução de inegável interesse, mas a comprovação por análise experimental é essencial.

A aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres auto-lançáveis afigura-se como um exemplo particularmente promissor, que se espera ser comprovado pelos ensaios experimentais actualmente em curso.

8. Referências

- Alexander, R. McNeill, "**Animal Mechanics**", Sidgwick & Jackson London, 1968
- Bombardelli, C., "**Ossa lunghe: elementi naturali resistenti a flessione**", in ACCIAIO – “Studi e ricerche”, 1982, pp. 408-415
- D’Arcy Thompson, "**On Form and Growth**", Cambridge University Press, 1917
- Fung, Y. C., "**Biomechanics - Mechanical Properties of Living Tissues**", Springer Verlag, 1981
- Hildebrand, Milton, "**Analysis of Vertebrate Structure**", John Wiley & Sons, Inc., 1988
- Knauff Micha, Sadowski, A., "**Prestressing of circular tanks with tendons connected on the circumference – Snoko System**", *Proc., FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures*, London, 1996, 1014-1021.
- Montens, S., "**A Global Concept for 21st Century Bridges: Parastressing**" *Proc., FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures*, London, 1996, 739-746.
- Pacheco, P.; Adão da Fonseca, A., "**Effector Systems in Structures**" - *Conceptual Design of Structures – Proc. IASS Symposium*, Stutgard, 1996, 339-346
- Pacheco, P.; Adão da Fonseca A., "**Organically Prestressed Multi-Span Continuous Box Girders**". *New Technologies in Structural Engineering – Proc. IABSE International Conference*, Lisboa, 1997, 527-534.
- Pacheco, P.; Quinaz, M. C., Adão da Fonseca, A., "**Aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres auto-portantes**", *Proc. 1º Encontro de Estruturas Metálicas e Mistas*, Porto, 1997, 331-339.
- Pacheco, P., "**Organic Prestressing – an example of an Effector System**", PhD Thesis, Dep. Civil Engrg, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999 (in Portuguese).

- Pacheco, P. , Adão da Fonseca A. , “**Organic Prestressing**”, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp 100-107, March, 2002 (a).
- Pacheco, P.; Adão da Fonseca, A. - “**Organic Prestressing – an example of an effector system**” – *Structural Concrete - Journal of the Fib*, Volume 3, n. 2, pp 107-113, 2002 (b).
- Pacheco, P.; Adão da Fonseca, A., Delgado R. - “**Dynamic Problems in Static Control of Structures**” – Journal of Structural Engineering, ASCE, waiting for acceptance, 2003
- Pennycuik, C. J., “**Newton Rules Biology: A physical approach to biological problems**”, Oxford University Press, 1992.
- Soong, T. T., “**Active Structural Control: Theory and Practice**”, Longman, London and Wiley, New York, 1990.
- Testut, T., “**Tratado de Anatomia Humana**”, Salvat Editores, S.A. Barcelona Buenos Aires, 1947.

9. Simbologia

Neste artigo é usada a seguinte simbologia.

G, Q	= cargas permanentes; cargas variáveis;
OPS	= sistema OPS;
nc	= número de contracções activas;
$Sci\ or\ i$	= secção de controlo (fibra relevante da secção de controlo);
t	= instante t;
Δ_a	= margem de actividade;
Δ_c	= margem de compressão;
Δt	= incremento de tempo;
σ	= tensão;
$\bar{\sigma}$	= incremento de tensão;