

Optimização das Forças de Instalação dos Cabos de Pontes de Tirantes*

Optimization of Cable Stretching Forces in Cable-Stayed Bridges

João H. J. O. Negrão**
e Luís M. C. Simões***

RESUMO

A optimização das forças nos cabos de pontes atirantadas pode inserir-se num dos dois tipos de problemas a seguir indicados: a) determinação das forças de instalação nos cabos de modo a encontrar uma estrutura de custo mínimo que respeite a geometria de projecto para a acção do peso próprio; b) determinação das forças de ajustamento que, corrigindo os erros nos deslocamentos medidos nos pontos de controlo, resultam num agravamento mínimo das tensões nos estágios seguintes e na estrutura final. No primeiro tipo de problemas tenta otimizar-se simultaneamente as forças de pré-esforço e variáveis de dimensionamento e geométricas de modo a obter uma estrutura de custo mínimo. No segundo caso admite-se que a estrutura está a ser executada, pelo que o conjunto de variáveis de decisão consiste apenas em variações nas forças de pré-esforço nos cabos. Nesta comunicação discutem-se os aspectos mais relevantes destes problemas e as metodologias utilizadas pelos autores para a sua consideração. Apresentam-se exemplos que ilustram ambos os métodos.

ABSTRACT

Cable stretching optimization problems may basically be of two types: a) finding the installation forces of the cables, so as that feasible minimum cost design and the dead load geometry condition are met; b) finding the adjustment forces which correct errors in deflections under control while resulting in minimum stress increase in further erection stages and final structure. In the first type one intends to simultaneously optimize cable prestressing, sizing and shape design variables so as to get minimum structural cost. In the latter it is assumed that a structure is under construction. Therefore, design variable set consists only of cable prestressing changes. This paper discusses some of the main issues of such problems and the approaches undertaken by the authors to handle them. Illustrative examples of both types are briefly presented.

1 - INTRODUÇÃO

Alguns autores (Bhatti *et al.*, 1985; Ohkubo e Taniwaki, 1991) investigaram a optimização do custo de pontes de tirantes utilizando variáveis de dimensionamento e geometria como variáveis de decisão. O problema de otimizar as forças de pré-esforço quer em termos globais quer para efeitos correctivos foi abordado por Osuo *et al.* (1987) e Qin (1992). Contudo, o aspecto óbvio de combinar as variáveis de dimensionamento/geométricas com as forças de pré-esforço, com grande potencial para conduzir a uma solução adequada, realista e óptima, não foi ainda abordado.

A maior parte dos estudos relativos à optimização das forças nos cabos baseia-se na utilização de uma matriz constituída por coeficientes de influência que aceitam como

válido o modelo linear e cuja determinação é um processo lento e dispendioso, sobretudo nos sistemas com um grande número de cabos. Além disso, os módulos de análise e optimização utilizados neste tipo de problemas provêm frequentemente de *packages* de código independentes, o que requer o desenvolvimento de interfaces específicas para pré e pós-processamento, de modo a organizar os dados no formato requerido em cada uma das tarefas. Além de assegurar a ligação entre os módulos, as interfaces devem chamar a si a tarefa de actualização automática de dados, uma vez que os ciclos sucessivos do processo de optimização produzem repetidas modificações do dimensionamento. Assim e independentemente das características do algoritmo de optimização, a eficácia do processo fica seriamente afectada caso não se disponha de interfaces adequadas.

2 - PROGRAMA CIAO

Estas considerações fundamentaram o desenvolvimento de um programa de optimização baseado em análise de Elementos Finitos, apropriado para pré-dimensionamento de pontes de tirantes. O programa foi denominado CIAO,

* Comunicação apresentada no V Encontro Nacional de Mecânica Computacional.

** Professor Auxiliar, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil.

*** Professor Catedrático, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil.

sigla obtida da abreviatura de Cable-Stayed Bridges Integrated Analysis and Optimization. Cientes da desconfiança dos profissionais de Engenharia Civil relativamente a técnicas de optimização, os autores adoptaram para a implementação do código uma filosofia amigável de utilização. São também proporcionados alguns recursos de interactividade de modo a que a evolução das soluções obtidas nas sucessivas iterações possa ser acompanhada pelos interessados.

Segue-se uma descrição breve das características do programa mais relevantes para o objectivo desta apresentação. Para uma descrição mais detalhada remetem-se os leitores para as referências Simões e Negrão (1994) e Negrão e Simões (1996), (1997).

2.1 – Biblioteca de variáveis de decisão

Uma ponte atirantada é caracterizada por uma grande diversidade de parâmetros relacionados com a descrição da secção, geometria genérica, pré-esforço dos cabos e tabuleiro, pelo que é desejável que esteja disponível uma vasta gama de tipos potenciais de variáveis de decisão. Por esse motivo, o princípio organizativo utilizado no programa foi o de desenvolver e agrupar estes tipos numa biblioteca de variáveis, da qual o utilizador se serve de forma semelhante à das bibliotecas de elementos finitos. Quando se pretende optimizar o custo da estrutura, as melhores soluções resultam da combinação de parâmetros de dimensionamento, forma e pré-esforço. A biblioteca contém tipos de variáveis de decisão de cada uma destas categorias. Nas Figs. 1 e 2 encontram-se representados os tipos de variáveis actualmente disponíveis. Uma vez que só as variáveis de decisão geométricas dependem do tipo de estrutura, o programa poderá aplicar-se a sistemas estruturais diferentes, podendo obter-se uma estrutura optimizada em relação às variáveis de dimensionamento.

A ligação entre variáveis de decisão e a malha de elementos finitos é estabelecida pelo recurso a uma *matriz de dependências*. Esta é constituída por coeficientes inteiros

cujas posição $i - j$ está associada à ligação entre o elemento i e a variável j , sendo o tipo desta estabelecido pelo valor do coeficiente, segundo a descrição convencionada na biblioteca de variáveis. Na ausência de relação directa (explícita) entre um elemento e uma variável, o coeficiente $i - j$ toma o valor 0.

2.2 – Análise de sensibilidades

Os problemas de optimização de pontes de tirantes podem facilmente envolver uma centena de variáveis de decisão. Além disso e dependendo do nível de discretização das dimensões das secções, as condições críticas de projecto podem ocorrer em qualquer ponto da estrutura. Por esse motivo não é fácil implementar uma estratégia de eliminação de constrangimentos baseada nas regiões críticas potenciais, sobretudo quando existem múltiplas condições de carregamento e acções dinâmicas, sem cuja consideração não é possível obter uma solução óptima fiável. Há assim que ter em conta centenas ou mesmo milhares de constrangimentos de tensões e deslocamentos.

Estas considerações e a acessibilidade ao código-fonte de análise estrutural determinaram a escolha do método analítico discreto directo para efectuar a análise das sensibilidades.

2.3 – Fases construtivas

Um projecto realista de uma ponte de tirantes deve ter em conta a sequência de fases construtivas intermédias conducentes à estrutura final, uma vez que é nelas que com frequência ocorre a condição dimensionante para muitos elementos estruturais. Este problema é normalmente resolvido efectuando uma retroanálise, na qual se parte do estado final (conhecido) da estrutura para, por “desmantelamento” progressivo do modelo, se chegar às forças de instalação dos tirantes. Este procedimento não é o mais conveniente no contexto de optimização estrutural, uma vez que toda a informação relativa a tensões, deslocamentos e respectivas sensibilidades tem de estar simultaneamente disponível no final da fase de análise para uso imediato no módulo de optimização.

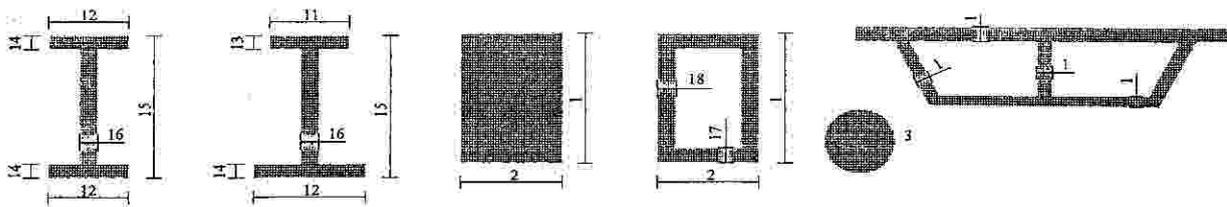


Fig. 1 – Variáveis de decisão de dimensionamento

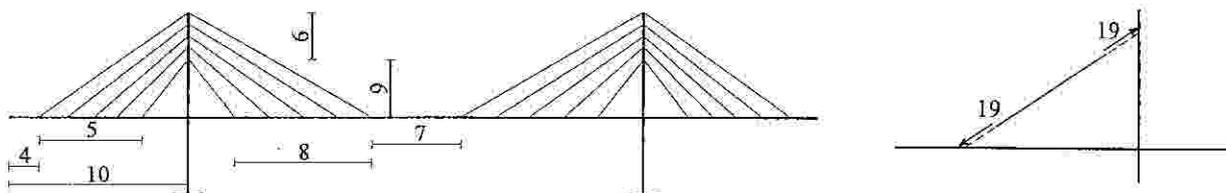


Fig. 2 – Variáveis de decisão de forma e de pré-esforço nos cabos

Para resolver este problema, a sequência cronológica que corresponde às fases construtivas foi representada por uma discretização física. Gera-se uma estrutura global descontínua, constituída pela estrutura completa e pelas fases intermédias representativas ou seleccionadas. A matriz de rigidez daí resultante é constituída por submatrizes desacopladas, o que se reflecte num aumento moderado do custo de procedimento mas permite levar a cabo de forma conjunta a análise e cálculo de sensibilidades da estrutura completa e suas fases construtivas.

2.4 – Efeito de catenária nos cabos

A principal fonte de comportamento geometricamente não-linear nas pontes de tirantes é o efeito de catenária dos cabos. Para ultrapassar este problema podem utilizar-se diversas metodologias, tais como a modelação dos cabos por cadeias de elementos de barra convencionais, formulações específicas de elementos de catenária, etc. Contudo, qualquer destes processos requer a implementação de um procedimento geometricamente não-linear, o que terá custos significativos em eficiência tendo em vista a optimização da estrutura. Foi por esse motivo adoptado o método do módulo equivalente de Ernst que permite a utilização de uma análise pseudolinéar.

3 – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO

A metodologia adoptada neste trabalho conduz a um procedimento unificado adaptável a cada um dos problemas referidos no Resumo. Utilizando uma optimização multicritério baseada em entropia, o problema pode ser formulado como a minimização de uma função escalar convexa sem constrangimentos. Deste modo obtém-se uma solução óptima (de acordo com a definição de Pareto) a partir de uma configuração inicial em cada iteração. Representando por \underline{x} o vector das variáveis de decisão e por

$$g_0(\underline{x}) = V / V_0 - 1 \quad (1)$$

o constrangimento de custo

$$g_i(\underline{x}) = \sigma_i / \sigma_0 - 1 \quad i = 1, M_s \quad (2)$$

os constrangimentos de tensões

$$g_j(\underline{x}) = \delta_j / \delta_0 - 1 \quad j = 1, M_k \quad (3)$$

os constrangimentos cinemáticos

os problemas de optimização podem formular-se como

$$\text{minimizar } F(\underline{x}) = \frac{1}{\rho} \ln \sum_{i=1}^M e^{\rho g_i(\underline{x})} \quad (4)$$

expressão que, para tratamento numérico efectivo, pode substituir-se pela forma explícita

$$F(\underline{x}) = \frac{1}{\rho} \ln \sum_{i=1}^M e^{\rho \left(g_i(\underline{x}_0) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial g_i(\underline{x}_0)}{\partial x_j} \Delta x_j \right)} = \frac{1}{\rho} \ln \sum_{i=1}^M e^{\rho \left(g_i(\underline{x}_0) + \underline{\nabla}^T (g_i) \underline{\Delta x} \right)} \quad (5)$$

sendo $M = M_s + M_k$ o número total de constrangimentos associados a tensões e deslocamentos, σ_0 a tensão admissível, δ_0 uma tolerância especificada para as deformações totais ou correctivas sob controle e s dependendo do tipo de problema de optimização em consideração:

$s = 0$ para problemas de optimização de custo, contendo \underline{x} neste caso variáveis de dimensionamento, geométricas e de pré-esforço nos cabos;

$s = 1$ para o problema de optimização de forças correctivas, caso em que \underline{x} é constituído somente por variáveis associadas a incrementos de pré-esforço nos cabos (sendo fixas as dimensões e geometria).

Foram escolhidos dois exemplos representativos, que ilustram a adequação do método proposto para a resolução de ambos os problemas de optimização atrás indicados.

4 – EXEMPLOS

No primeiro exemplo optimiza-se o custo da ponte de tirantes simétrica cuja geometria está representada na Fig. 3. A estrutura é analisada através de um modelo tridimensional. Consideram-se quatro condições de carregamento para além do peso próprio: sobrecarga em todo o vão, sobrecarga no vão central, sobrecarga nos vãos laterais e controlo das deformações sob acção da carga permanente na estrutura completa. Duas longarinas em I dispostas nos bordos do tabuleiro suportam carlingas espaçadas de 7,5 m. As torres são constituídas por secções rectangulares ocas. Para processo construtivo utiliza-se o método dos avanços sucessivos em consola, sendo as fases construtivas daí decorrentes consideradas no modelo de análise. Dispõem-se somente ligações verticais entre os pilares e o tabuleiro, salvo nas fases iniciais da construção, cuja estabilidade requer apoios temporários adicionais. Bielas diagonais simulam a rigidez da laje do tabuleiro no seu plano.

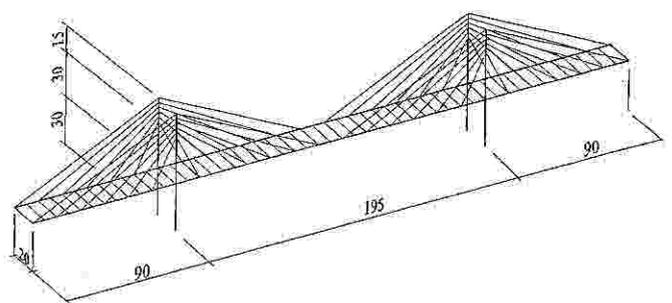


Fig. 3 – Geometria da configuração inicial

Considera-se um total de 55 variáveis de decisão. As primeiras 41 são variáveis de dimensionamento respeitantes às larguras e espessuras dos banzos e almas das longarinas, carlingas e pilares, bem como às áreas de secção transversal dos 12 pares de tirantes. As 12 variáveis seguintes correspondem aos pré-esforços de fixação dos tirantes. Finalmente, as duas últimas variáveis são de tipo geométrico, permitindo a alteração da altura e posicionamento das amarrações dos tirantes nas torres.

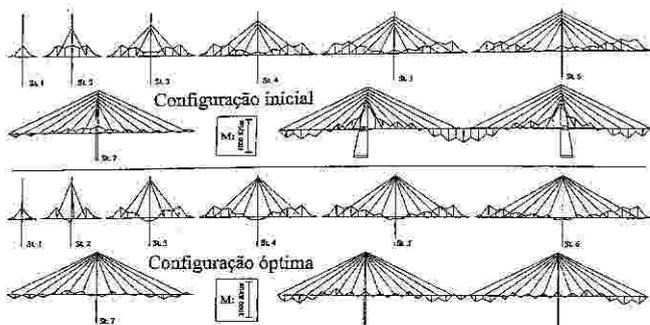


Fig. 4 - Momentos flectores para cargas permanentes nas configurações inicial e ótima

QUADRO 1

Valores iniciais e finais das forças de instalação dos tirantes do exemplo 1 (KN)

Cabo#	1	2'	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inic.	2046	2838	2496	2250	1958	1513	1513	1958	2250	2496	2838	2194
Opt.	2118	2947	2390	2149	1965	2080	1959	1847	2152	2425	2749	2416

Admitindo para todos os elementos de estrutura o mesmo factor de custo volúmico, conseguiu-se uma redução de cerca de 30%. Não obstante as aparentemente pequenas alterações nas forças de pré-esforço, deve atender-se a que a estrutura final é mais leve do que a inicial, o que aumenta sensivelmente a eficiência destas forças na suspensão do tabuleiro com redução dos deslocamentos verticais ao longo do vão. Este efeito é visível na Fig. 5, em que se representam as deformadas para as configurações inicial e otimizada, na condição de carga permanente.

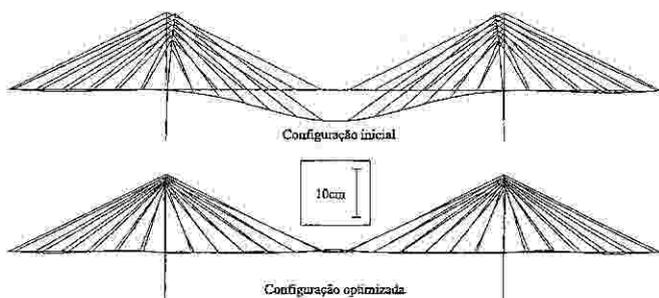


Fig. 5 - Deformadas para a condição de carga permanente

No exemplo 2 admite-se que se procede à observação dos deslocamentos da estrutura no termo da fase construtiva nº 5. Supõe-se ainda que desta se obtêm os desvios indicados no Quadro 2 entre os deslocamentos verticais previstos pelo modelo numérico e os efectivamente medidos nas amarrações dos tirantes. Os cabos 1-2 e 11-12 não estão ainda instalados, mas o tabuleiro prolonga-se em consola até às posições correspondentes às amarrações dos tirantes 2 e 11 no tabuleiro.

QUADRO 2

Desvios dos deslocamentos esperados na fase 5

$$(\Delta = \delta_{\text{medido}} - \delta_{\text{esperado}}) \text{ (cm)}$$

Cabo#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δ	-	+2	+3	+2	0	0	0	0	+2	+3	+4	-

Resolve-se agora um novo problema de optimização em que se procura determinar os ajustamentos nos cabos que corrigem esses deslocamentos, afectando o menos possível as fases construtivas seguintes e a estrutura final. Uma vez que a solução corrigida satisfaz a geometria da 5ª fase construtiva da ponte e que se admite um comportamento linear para este passo correctivo, não resultarão desta correcção modificações na geometria da estrutura final nem nas tensões da parte da estrutura ainda por executar. Deste modo só os deslocamentos da fase 5 e as tensões nos elementos partilhados pelas fases 5, 6, 7 e estrutura final vão ser contemplados como objectivos. O número de variáveis de decisão reduz-se para 8, correspondendo às forças de pré-esforço nos cabos 3-10. No Quadro 3 indicam-se os valores iniciais e finais das forças de pré-esforço na fase 5. As forças correctivas adicionais podem ser obtidas com base nestes valores seja utilizando o padrão de influência nas forças nos cabos seja, se a operação for controlada por medição do alongamento dos tirantes, calculando a espessura adicional da placa de ancoragem a partir do aumento do pré-esforço de fixação nas amarrações e do módulo tangente de cada tirante.

QUADRO 3

Forças nos tirantes na fase 5 antes e depois do ajustamento correctivo (KN)

Cabo#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Antes	-	-	2390	1529	1103	1024	1143	943	1563	2425	-	-
Após	-	-	2416	1513	1053	1086	1259	844	1548	2462	-	-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BHATTI, M. Asghar; RAZA, S. M. Nazir; RAJAN, S.D. — Preliminary optimal design of cable-stayed bridges. *Engineering Optimization*, **8**, 265-289, 1985.
- NEGRÃO, J.H.; SIMÕES, L. M. C. — Optimization of cable-stayed bridges with three-dimensional modelling. *Computers & Structures*, **64**, pp. 741-758, 1977.
- NEGRÃO, J. H.; SIMÕES, L. M. C. — Effectiveness of modal/spectral versus time-history methods in optimization of cable-stayed bridges under seismic action, *19th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Kyoto, Japan, pp. 268, 1996.
- OHKUBO, S.; TANIWAKI, K. — Shape and sizing optimization of steel cable-stayed bridges. In: *Optimization of Structural Systems and Ind. Applic.* (Hernandez and Brebbia eds.), Proc.OPTI 91, Elsevier App. Sc., Cambridge, MA, U.S.A., 529-540, 1991.
- OSUO, Yasutoshi; TOSHIMORI, Naohisa; SUZUKI, Yasuhiro — A calculation method of shim thickness to adjust cable lengths at erection of cable-stayed bridges, *Proc. Int. Conf. on Cable-Stayed Bridges*, Bangkok, Thailand, pp. 891-902. 1987.
- QIN, Chen — Optimization of cable-stretching planning in construction of cable-stayed bridges, *Engineering Optimization*, **19**, pp. 1-20, 1992.
- SIMÕES, L. M. C.; NEGRÃO, J. H. — Sizing and geometry optimization of cable-stayed bridges, *Computers and Structures*, **52** (4), pp. 309-321, 1994.