



Forças de implantação nas pontes estaiadas

Pedro Afonso de Oliveira Almeida (1); Rui Oyamada (2); Hideki Ishitani (3)

(1) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações
Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Email: palmeida@usp.br*

(2) *Mestre em Engenharia Civil pela EPUSP, diretor da OUTEC Engenharia de Projetos
Email: rui.oyamada@poli.usp.br*

(3) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações
Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Email: hideki@usp.br*

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº. 83, Cidade Universitária, São Paulo/SP, CEP 05508-900

Resumo

O conhecimento das forças de implantação dos estais é de extrema importância no controle do greide final do tabuleiro da ponte estaiada. De maneira geral, as aduelas que vão sendo anexadas alteram os esforços e deslocamentos na parte já executada, inclusive nos estais já posicionados.

Normalmente, tem-se por objetivo garantir o greide final do tabuleiro, o que se consegue com uma criteriosa definição das forças de implantação dos estais. Estas forças podem ser obtidas a partir da solução de um problema fundamental que consiste na determinação de acréscimos de força nos estais, necessários para atingir um vetor de deslocamentos, geralmente compostos de flechas em pontos do tabuleiro. Normalmente, estes deslocamentos correspondem às contraflechas necessárias para retornar o tabuleiro às suas cotas originais.

Em função do programa de tensionamento dos estais estabelecido para a obra, pode se tornar necessário a aplicação de uma correção sequencial de forças nos estais, para se chegar às forças finais previstas no projeto.

Será apresentado neste trabalho a resolução do problema fundamental, o procedimento de correção sequencial de forças nos estais e uma aplicação real relativa ao viaduto estaiado da Rodovia dos Imigrantes.

1 Introdução

Em estruturas estaiadas como pontes e viadutos, a determinação das forças de implantação tanto final quanto durante a montagem necessariamente esta relacionada à ação direta do carregamento permanente mais a interação com a deformabilidade do estaiamento, incluindo o sistema tabuleiro e torre, aqui denominado de problema fundamental. Por outro lado, ao longo das fases de montagem torna-se necessário a determinação das forças de ajuste do estaiamento considerando-se a distribuição espacial das forças do estaiamento, também considerado neste trabalho. Como exemplo de aplicação desses modelos, tomou-se como referência o esquema estrutural do viaduto “Mario Covas”, construído recentemente sobre a Rodovia do Imigrantes.

2 Problema fundamental

Um método prático de resolução do problema fundamental consiste em utilizar um recurso usual dos programas de cálculo estrutural, que permite aplicar variações de temperatura aos diversos elementos estruturais. Considere-se o esquema estrutural mostrado na fig. 1, constituído de um tabuleiro (1-2-3-4) suportado por quatro estais (E1, E2, E3, E4) apoiados na torre. Considere-se a aplicação de temperaturas T_i em cada estai. Sejam w_i os deslocamentos dos pontos i segundo o eixo z .

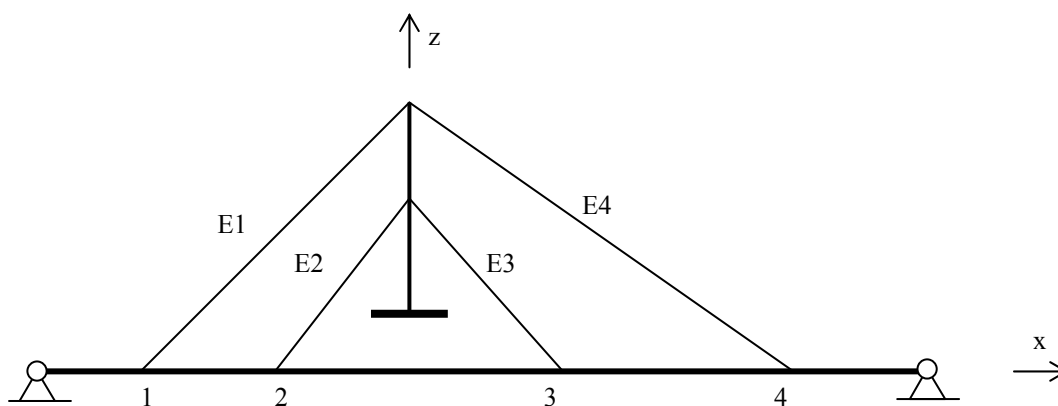


Figura 1

Devido ao comportamento elástico linear da estrutura pode-se escrever:

$$\begin{cases} f_{11}T_1 + f_{12}T_2 + f_{13}T_3 + f_{14}T_4 = w_1 \\ f_{21}T_1 + f_{22}T_2 + f_{23}T_3 + f_{24}T_4 = w_2 \\ f_{31}T_1 + f_{32}T_2 + f_{33}T_3 + f_{34}T_4 = w_3 \\ f_{41}T_1 + f_{42}T_2 + f_{43}T_3 + f_{44}T_4 = w_4 \end{cases}$$

ou

$$[f] [T] = [w]$$

onde cada linha de [f] pode ser determinado fazendo-se $T_j=1$ e $T_k=0$ ($k \neq j$), isto é:

$$f_{ij}=w_i .$$

Se w_i (correção $[w_o]$ a ser imposto) é conhecido, tem-se

$$[f] [T] = [w_o]$$

ou

$$[T] = [f]^{-1} [w_o].$$

A aplicação destas diferenças de temperatura aos estais correspondentes (carregamento T) permite efetuar a correção desejada nos pontos escolhidos.

Se $[w_o]$ for devido à carga g (carregamento g), obtêm-se cotas “zeradas” nos pontos selecionados através da aplicação de $-[T]$ aos estais. Neste caso, o esforço final em cada tirante resulta da composição direta dos carregamentos, ou seja, $(g + T)$.

3 Forças a serem aplicadas individualmente nos estais visando valores finais predefinidos

Neste caso, quer-se conhecer as forças F_i que devem ser aplicadas nos estais visando obter valores da variação total F_{oi} .

Pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} 1 & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & 1 & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & 1 & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{o1} \\ F_{o2} \\ F_{o3} \\ F_{o4} \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad [e] \cdot [F] = [F_o]$$

sendo e_{ij} são coeficientes de influência de força obtidos com $F_j=1$ e $F_k=0$ ($k \neq j$).

Resultam, assim, os valores procurados

$$[F] = [e]^{-1} \cdot [F_o].$$

4 Aplicação prática

Apresenta-se na fig. 2 uma vista do Viaduto Estaiado da Rodovia dos Imigrantes entregue ao tráfego em dezembro de 2002. Esse viaduto é estaiado em dois planos verticais localizados um de cada lado do tabuleiro. Cada plano com extensão de 170 m contém 22 estais ancorados em uma única torre central de 55 m de altura total, resultando em um tabuleiro com dois vãos de 85m, em curva vertical com desnível máximo de 4m. O

número de cordoalhas nos estais varia de 15 a 54 $\phi 15,7\text{mm}$, CP 173 RB. Apresenta-se na fig 4 a seção transversal do viaduto, onde as vigas laterais suportam as transversinas posicionadas a cada 3,5m. O esquema estrutural utilizado na modelagem de um plano de estaiamento está apresentado na fig. 4.

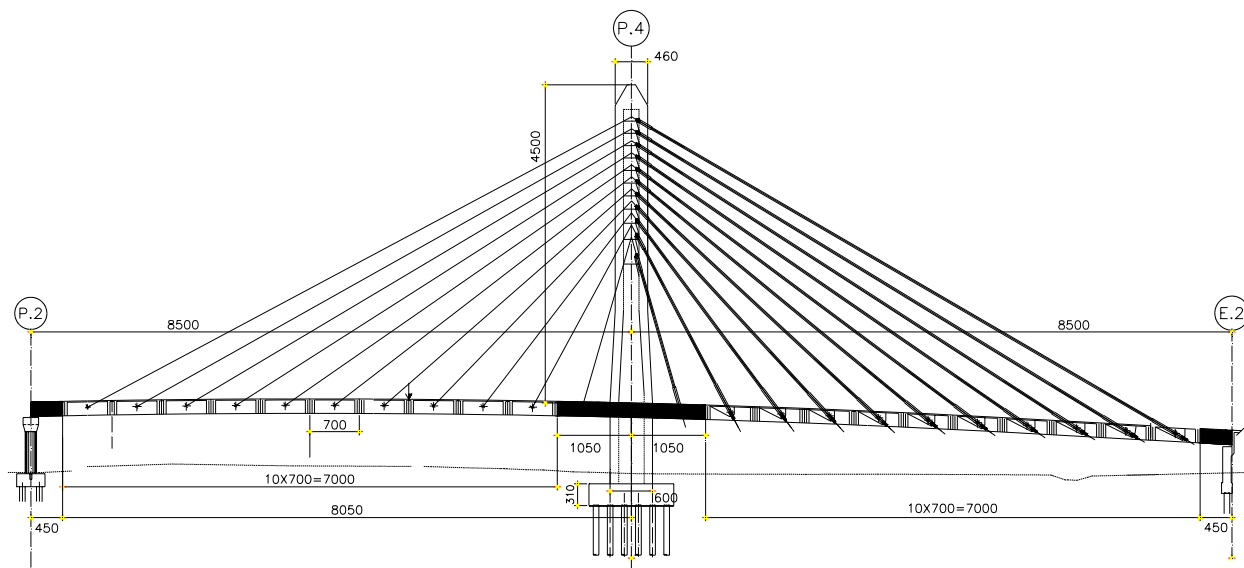


Figura 2 – Vista geral

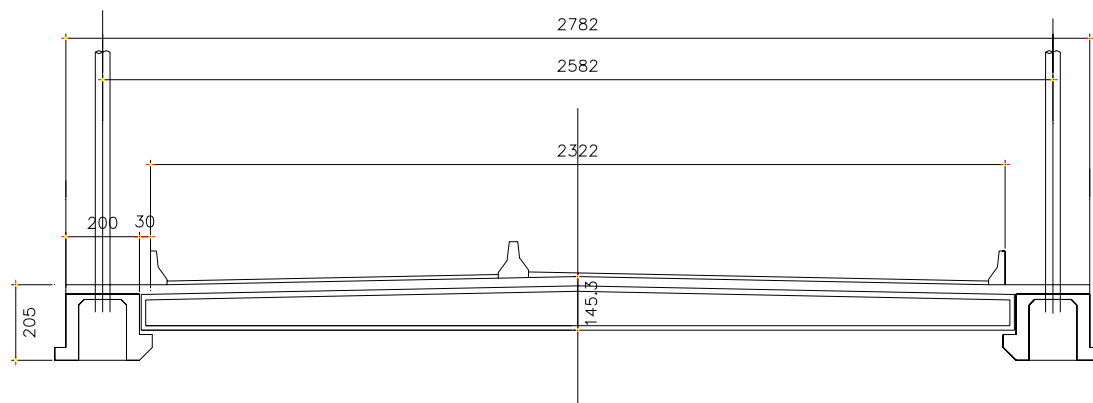


Figura 3 – Seção transversal do tabuleiro

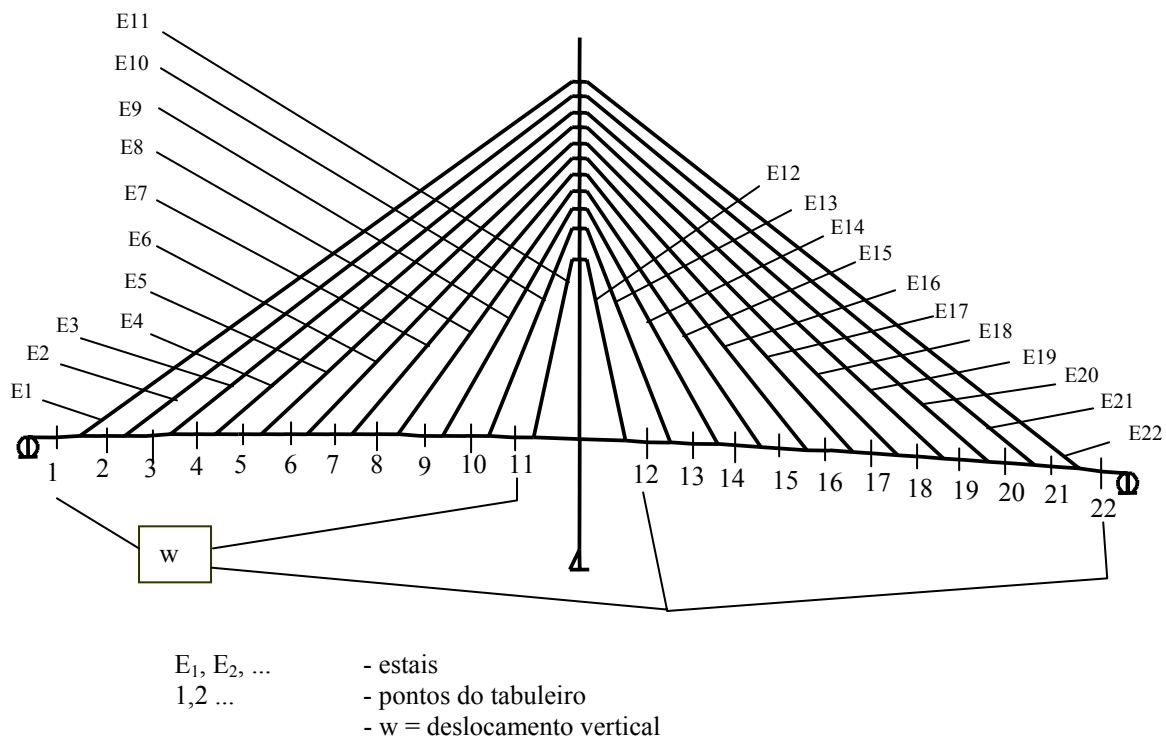


Figura 4 - Esquema Estrutural

4.1. Correção de flechas

Como exemplo da aplicação do problema fundamental, determinou-se as forças nos estais que anulam as flechas no tabuleiro decorrentes da carga permanente. Essas flechas estão esquematizadas na fig.5.

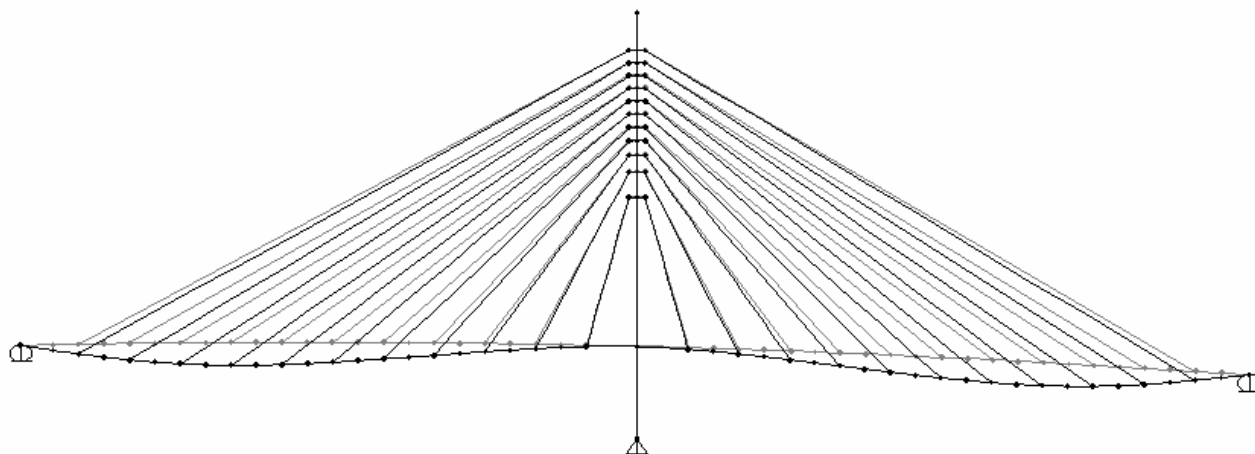


Figura 5 - Flechas de carga permanente

O resultados obtidos estão apresentados na tab. 1 para cada ponto de interesse.

Tabela 1 - Correção de flechas

Ponto	[wg](m)	F(kN)	w(g+To)
1	-0.0776	5700	-2E-15
2	-0.1854	1859	-6.2E-15
3	-0.2634	4898	-9.8E-15
4	-0.3061	2005	-9.2E-15
5	-0.3148	3795	-1.2E-14
6	-0.295	2237	-1.3E-14
7	-0.2544	2634	-1.3E-14
8	-0.2016	2531	-1.2E-14
9	-0.144	1561	-9.4E-15
10	-0.0881	1819	-5.3E-15
11	-0.0394	3473	-1.9E-15
12	-0.0411	4300	2.68E-15
13	-0.091	542	3.14E-15
14	-0.148	3181	5.63E-15
15	-0.2062	1159	4.39E-15
16	-0.259	3566	3.16E-15
17	-0.2984	2057	3.28E-15
18	-0.316	3618	3.94E-15
19	-0.3043	2733	4.88E-15
20	-0.2582	4149	4.83E-15
21	-0.177	2917	3.52E-15
22	-0.0672	4871	1.36E-15

[wg] (m): flechas devido a carga g indicada na fig. 5

F (kN): forças nos estais

w (g+To): flecha final devido a (g+To) mostrada na fig. 6

As forças nos estais, mostrados na coluna F da tab. 1, anulam as flechas [wg]. O resultado final pode ser comprovado na coluna w(g+To). A deformada final esta apresentada na fig. 6, onde se nota um leve desvio da torre, indicativo de uma flexão longitudinal da torre proveniente do desnível do "greide" do tabuleiro.

De maneira geral, este processo pode ser utilizado para controlar qualquer variável de interesse, neste caso, em número igual ao número de estais. Assim, pode-se incluir, por exemplo, pontos de controle de desvio do pilar, principalmente, quando se tem estais de equilíbrio ancorados junto a pilares laterais,

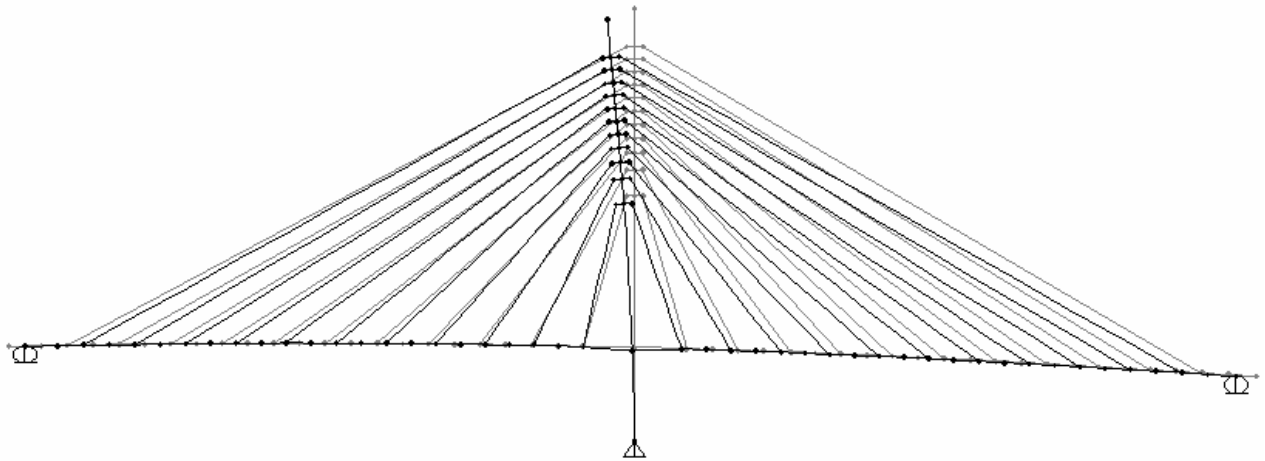


Figura 6 - Deformada após correção das flechas

4.2. Correção de força nos estais

Na aplicação seguinte determinou-se as forças adicionais $[F]$, a serem aplicadas individualmente nos estais, para se obter os acréscimos finais $[F_o]$ predefinidos. Apresenta-se na Tabela. 2 os valores das forças nas duas fases referenciadas.

Tabela 2 - Correção de forças

Estai	F_o (kN)	F (kN)
E1	57	94
E2	19	82
E3	49	138
E4	20	142
E5	38	162
E6	22	165
E7	26	176
E8	25	159
E9	16	132
E10	18	79
E11	35	56
E12	43	60
E13	5	60
E14	32	133
E15	12	134
E16	36	168
E17	21	149
E18	36	147
E19	27	135
E20	41	121
E21	29	82
E22	49	78

F_o (kN): Acréscimos de força a serem atingidas

F (kN): forças a serem aplicadas isoladamente aos estais

Observa-se que as forças individuais a serem aplicadas aos estais são maiores do que as forças finais pretendidas. Este resultado reflete o fato de que,

normalmente, ocorre a diminuição do comprimento de um estai "encurtamento" em decorrência do tensionamento dos demais estais, provocando uma variação de força (ΔF), que deve ser acrescentado à força de correção.

É importante estar atento quando da aplicação da força de correção para não ultrapassar os limites de dimensionamento das peças estruturais, tais como, longarinas, transversinas, torres, fundações e os próprios estais.

Este processo foi utilizado para equalizar as forças nos estais correspondentes dos dois planos de estaiamento do Viaduto.

5 Conclusão

Os dois procedimentos apresentados são adequados ao projeto de obras estaiadas, para definir as forças nos estais visando a regularização geométrica e garantindo a efetiva distribuição espacial das forças do estaiamento. Constituem, assim, ferramentas imprescindíveis no projeto de pontes e viadutos estaiados.

Referências

PODOLNY, W.; SCALZI, J. B. - **Construction and design of cable stayed bridges**. N. Y.: John Wiley, 1976.

WALTHER, R.; HOURIET, B.; ISLER, W.; MOÏA, P. - **Cable Stayed Bridges**. Thomas Telford Ltd, 1988, London.

GIMNSING, N. J. - **Cable Supported Bridges**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1998.