



29 NOV • 01 DEZ • 1995
NOV 29th • DEC 1st • 1995

XVI CILAMCE -

Congresso Ibero Latino Americano Sobre Métodos
Computacionais para Engenharia

29/NOV - 01/DEZ - 1995

Curitiba - PR - Brasil

Universidade Federal do Paraná

cpgMNE - Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia

CESEC - Centro de Estudos de Engenharia Civil Professor Inaldo Ayres Vieira

AMC - Associação Latino Americana para Métodos Computacionais em Engenharia

47

ANAIS

Volume I

1891897
080196

SYSNO 891897
PROD 000065

ACERVO EESC



29 NOV • 01 DEZ • 1995
NOV 29th • DEC 1st • 1995

CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO SOBRE MÉTODOS
COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA
IBERIAN LATIN AMERICAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL
METHODS FOR ENGINEERING

ESTUDO DE CABOS-TRELIÇA PELO PROCESSO DOS DESLOCAMENTOS

AGUIAR, E.O.

Aluna de Pós-graduação

BARBATO, R.L.A.

Professor Associado

Departamento de Engenharia de Estruturas

Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Caixa Postal, 359, 13560-250 - São Carlos, SP, Brasil

SUMÁRIO

Apresenta-se neste trabalho um estudo de cabos-treliça, onde se inclui uma análise da etapa da aplicação da protensão. Considerando-se cabos-treliça com hastes verticais e diagonais, investiga-se a influência do modo de aplicação da protensão na distribuição dos esforços no conjunto de cabos. Aplicam-se os carregamentos de protensão parceladamente, considerando a variação da direção da força. Em seguida, procede-se ao carregamento do cabo-treliça já protendido. A estrutura é estudada mediante o processo dos deslocamentos para estruturas de comportamento não linear (utilizando a matriz de rigidez tangente), admitindo-se, no entanto, a linearidade física do material e pequenas deformações.

1. INTRODUÇÃO

Consideradas como das mais indicadas para as grandes áreas livres, as coberturas pênséis compõem-se essencialmente de um sistema estrutural formado por cabos de aço e por um sistema vedante que nele se apóia. O sistema vedante é constituído por elementos de vedação e por peças e acessórios que têm a função de fixar os elementos nos cabos.

Dentre os diversos sistemas estruturais de coberturas pênséis, destaca-se o formado pelos cabos-treliça. O cabo-treliça, como se sabe, é constituído de dois cabos de curvaturas opostas conectados por hastes verticais ou inclinadas, de modo a formar uma treliça plana de banzos não paralelos. A figura 1 mostra as formas mais frequentes de cabos-treliça.

3.21.03.01-2

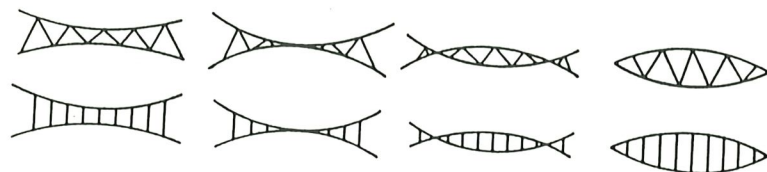


FIGURA 1

À treliça assim formada imprime-se um estado prévio de tração ou por meio de um dos cabos ou por meio das hastes de ligação, como se mostra na figura 2. Obtém-se, então, uma estrutura protendida de cabos de excelente desempenho estrutural, que permite o emprego de sistemas vedantes de baixo peso próprio.



FIGURA 2

Devido às suas características de estrutura leve, versátil e econômica, os cabos-treliça têm sido empregados na cobertura de ginásios de esportes, supermercados, depósitos, teatros, fábricas, pavilhões de exposição, hangares, etc. As figuras 3 e 4 mostram algumas das inúmeras associações de cabos-treliça para compor o sistema estrutural de coberturas pênseis.

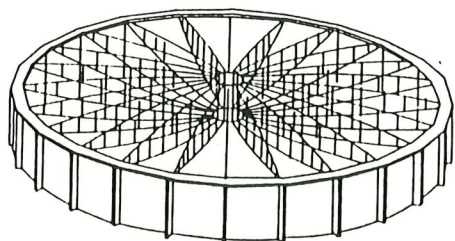


FIGURA 3

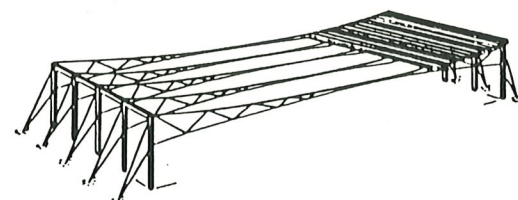
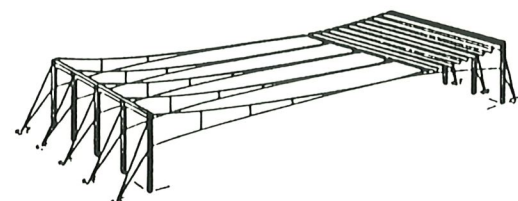
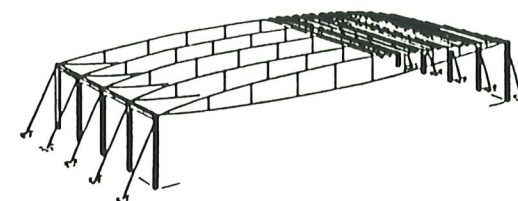


FIGURA 4

2. ANÁLISE DO CABO-TRELIÇA PELO PROCESSO DOS DESLOCAMENTOS

Para se proceder à análise, a estrutura é suposta constituída por um número finito de elementos conectados por nós. Os elementos (cabo ou barra) são definidos pelas coordenadas dos seus nós de extremidade (nó inicial e nó final), figura 5.

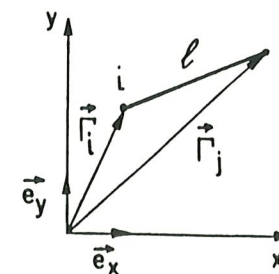


FIGURA 5

Os deslocamentos nodais são obtidos pela resolução da equação matricial

$$[K]\{d\} = \{F\} \quad (1)$$

onde $\{d\}$ é o vetor dos deslocamentos dos nós, $\{F\}$ é o vetor das ações neles aplicadas e $[K]$ é a matriz de rigidez tangente da estrutura, obtida a partir da matriz do elemento de cabo (BARBATO, 1994) dada a seguir.

$$[k] = \left(\frac{EA}{\ell} \right) \begin{bmatrix} m^2 & mn & -m^2 & -mn \\ mn & n^2 & -mn & -n^2 \\ -m^2 & -mn & m^2 & mn \\ -mn & -n^2 & mn & n^2 \end{bmatrix} + \left(\frac{T}{\ell} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nesta matriz E é o módulo de elasticidade do cabo, A é a área da sua seção transversal (suposta constante), T é a força de tração no elemento e ℓ , m e n são dados nas expressões seguintes:

$$\ell = [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$m = \frac{x_j - x_i}{\ell} \quad (4)$$

$$n = \frac{y_j - y_i}{\ell} \quad (5)$$

3. PROCESSO ITERATIVO DE CÁLCULO

Para iniciar-se o processo iterativo de cálculo admite-se uma determinada configuração de equilíbrio e para ela monta-se a matriz de rigidez da estrutura. Considerando-se, se for o caso, as forças reinantes nos elementos.

Em seguida, determina-se o desequilíbrio de cada nó considerando-se, para isso, o carregamento a ser aplicado e as forças nos elementos. Na sequência, aplicam-se nos nós as forças desequilibradas e calculam-se pela equação (1) os deslocamentos da estrutura e, portanto, as novas coordenadas dos nós. Observa-se que na primeira iteração o desequilíbrio considerado pode ser igual ao próprio carregamento. No passo seguinte, obtêm-se as forças nos elementos e verifica-se o equilíbrio nodal. O processo iterativo repete-se até que todos os nós da estrutura, de acordo com uma precisão estabelecida, estejam em equilíbrio.

No caso da protensão o processo de cálculo é incremental iterativo, tendo em vista a mudança da direção da força de protensão aplicada.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Analisa-se os cabos-treliça de 70m de vão esquematizados nas figuras 6 e 7.

O módulo de elasticidade dos cabos superior e inferior é de $1,5 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ e admite-se área da seção transversal dos cabos superior e inferior, respectivamente, iguais a 6 cm^2 e 4 cm^2 . Supõe-se seção transversal das hastes de ligação igual a $0,5 \text{ cm}^2$.

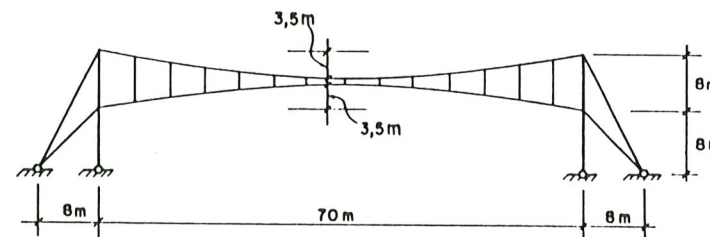


FIGURA 6

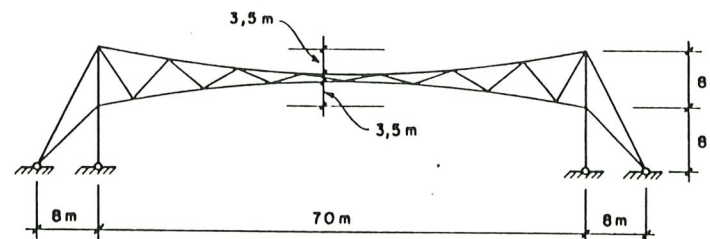


FIGURA 7

Para o cabo-treliça com hastes verticais, consideraram-se os seguintes carregamentos:

- carregamento de protensão de 100 kN aplicado nas extremidades do cabo inferior.
- carregamento de protensão de 100 kN aplicado nas extremidades do cabo inferior em 10 parcelas iguais de 10 kN, considerando a variação da direção de aplicação da força de protensão.
- carregamento b mais carregamento uniformemente distribuído ao longo de todo o vão de 1 kN/m.
- carregamento de protensão através das hastes, sendo para as hastes de extremidade força de protensão igual a 2,8 kN e para as restantes igual a 2,6 kN.
- carregamento d mais carregamento uniformemente distribuído ao longo de todo o vão de 1 kN/m.

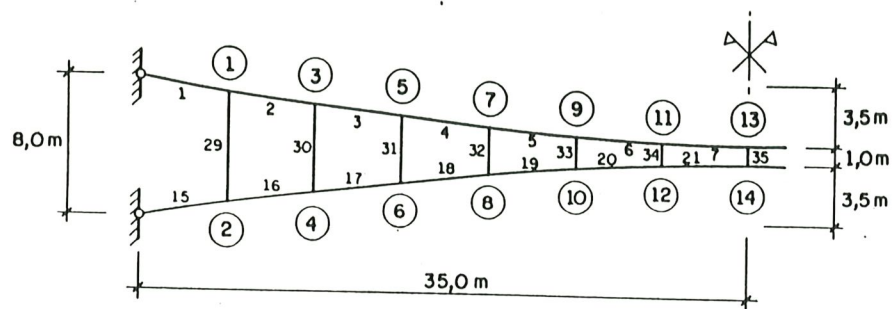


FIGURA 8

Os esforços, nos elementos e deslocamentos máximos nos nós, conforme a numeração da figura 8, encontram-se na tabela abaixo:

| TABELA 1 - ESFORÇOS NOS ELEMENTOS (kN) | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| elementos | carreg. a | carreg. b | carreg. c | carreg. d | carreg. e |
| 1 | 87,488 | 90,324 | 189,650 | 87,012 | 179,656 |
| 2 | 87,008 | 89,686 | 188,459 | 86,503 | 178,531 |
| 3 | 86,638 | 89,312 | 187,479 | 86,114 | 177,607 |
| 4 | 86,340 | 89,012 | 186,686 | 85,799 | 176,862 |
| 5 | 86,119 | 88,789 | 186,086 | 85,562 | 176,297 |
| 6 | 85,974 | 88,643 | 185,681 | 85,404 | 175,914 |
| 7 | 85,902 | 88,571 | 185,475 | 85,325 | 175,717 |
| 15 | 100,000 | 100,000 | 45,333 | 84,646 | 25,408 |
| 16 | 99,529 | 99,369 | 45,150 | 84,125 | 25,262 |
| 17 | 99,163 | 98,994 | 45,016 | 83,723 | 25,160 |
| 18 | 98,866 | 98,690 | 44,911 | 83,399 | 25,080 |
| 19 | 98,640 | 98,459 | 44,836 | 83,156 | 25,024 |
| 20 | 98,488 | 98,304 | 44,791 | 82,993 | 24,991 |
| 21 | 98,410 | 98,223 | 44,770 | 82,911 | 24,980 |
| 29 | 2,806 | 3,652 | 1,204 | 2,80 | 0,842 |
| 30 | 2,604 | 2,650 | 1,077 | 2,60 | 0,729 |
| 31 | 2,621 | 2,661 | 1,089 | 2,60 | 0,729 |
| 32 | 2,621 | 2,661 | 1,088 | 2,60 | 0,729 |
| 33 | 2,602 | 2,643 | 1,074 | 2,60 | 0,729 |
| 34 | 2,639 | 2,680 | 1,102 | 2,60 | 0,729 |
| 35 | 2,602 | 2,643 | 1,073 | 2,80 | 0,729 |
| DESLOCAMENTOS VERTICAIS MÁXIMOS (m) | | | | | |
| nó 13 | 0,233 | 0,245 | | 0,243 | |
| nó 14 | 0,234 | 0,245 | | -0,351 | |
| DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS MÁXIMOS (m) | | | | | |
| nó 6 | -0,064 | -0,069 | | -0,019 | |

Para o cabo-treliça com hastes diagonais consideraram-se os seguintes carregamentos:

- carregamento de protensão de 100 kN aplicado nas extremidades do cabo inferior.
- carregamento de protensão de 100 kN aplicado nas extremidades do cabo inferior em 10 parcelas iguais de 10 kN, considerando a variação da direção de aplicação da força de protensão.
- carregamento b mais carregamento uniformemente distribuído ao longo de todo o vão de 1kN/m.

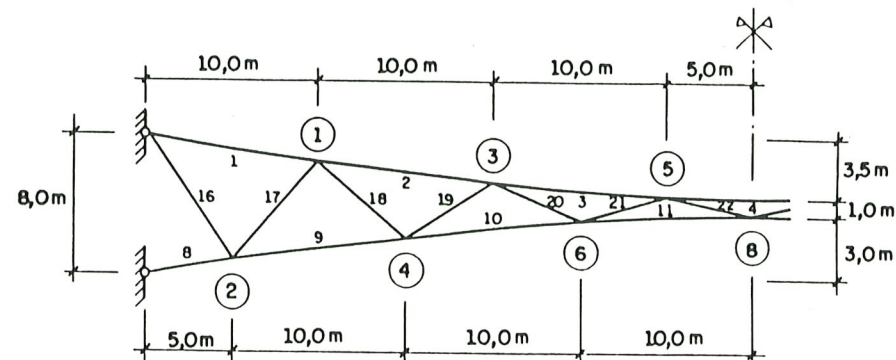


FIGURA 9

Os esforços nos elementos, conforme a numeração da figura 9, encontram-se na tabela abaixo:

| TABELA 2 - ESFORÇOS NOS ELEMENTOS (kN) | | | |
|--|-----------|-----------|------------|
| elementos | carreg. a | carreg. b | carreg. c |
| 1 | 84,987 | 84,665 | 191,514 |
| 2 | 82,640 | 82,297 | 186,184 |
| 3 | 80,025 | 79,651 | 177,459 |
| 4 | 78,686 | 78,287 | 170,039 |
| 8 | 100,000 | 100,00 | 56,487 |
| 9 | 99,186 | 98,900 | 58,035 |
| 10 | 97,719 | 97,468 | 61,094 |
| 11 | 94,466 | 94,269 | 68,453 |
| 16 | 3,686 | 2,921 | 3,505 |
| 17 | 3,029 | 2,999 | comprimido |
| 18 | 4,712 | 4,713 | 4,241 |
| 19 | 5,219 | 5,181 | comprimido |
| 20 | 7,232 | 7,230 | 8,027 |
| 21 | 10,059 | 10,002 | comprimido |
| 22 | 11,157 | 11,128 | 7,202 |

4. COMENTÁRIOS

Como pode-se observar da tabela 1 de esforços, a protensão aplicada incrementalmente fornece resultados menores (cerca de 3%) nos elementos do cabo superior, quando comparados com os esforços obtidos para o carregamento de protensão não parcelado. No caso dos elementos do cabo inferior os resultados se equiparam (diferenças menores que 0,2%). No entanto, esforços bastante distintos se obtêm nas hastes próximas ao ponto de aplicação da protensão, cerca de 23% maiores quando se considera a variação na direção de aplicação da força de protensão. Os deslocamentos verticais ocorrem nos nós centrais e são 5% maiores no caso da protensão parcelada, enquanto que os deslocamentos horizontais apresentaram diferenças percentuais maiores (8%).

Na prática, a aplicação da força de protensão é realizada de modo gradativo, o que leva a concluir que o melhor procedimento para simular o caso real deve ser o carregamento incremental.

Como era de se esperar, a protensão aplicada através das hastes verticais produz uma distribuição uniforme de esforços nos cabos superior e inferior, e deslocamentos do cabo superior para baixo, e do cabo inferior para cima com valor maior devido à menor rigidez (área da seção transversal menor).

No caso do carregamento uniformemente distribuído aplicado ao cabo superior, obviamente, este produz um acréscimo de força no cabo superior e uma redução das forças nas hastes e no cabo inferior. Todavia, a protensão aplicada pelos cabos leva a uma estrutura final com hastes e cabo inferior mais tracionados. Isso leva a crer que a protensão assim aplicada é mais eficiente que a protensão pelas hastes verticais.

O cabo-treliça com hastes diagonais, por sua vez, leva a uma distribuição de esforços de tração (tabela 2) bem maiores nas hastes, comparando-se com o caso das hastes verticais. Contudo, para o mesmo tipo de carregamento uniformemente distribuído, a força de protensão aplicada não foi suficiente para manter todos os elementos tracionados. Isso indica que ajustes devem ser feitos mediante o tracionamento destas hastes.

Portanto, o valor de protensão necessário a cada caso deve ser estudado, buscando-se uma distribuição de tensões, que para todos os tipos de carregamento da estrutura (permanentes e acidentais) não ocorra o afrouxamento dos cabos. Porém, um valor mínimo é desejável, já que esforços grandes nos sistemas de sustentação e ancoragem poderiam tornar a estrutura economicamente inviável.

5. REFERÊNCIAS

- BARBATO, R.L.A., 1991, "Emprego de cabos livremente suspensos e cabos-treliça na construção de coberturas pênseis", Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, SP, Brasil.
- BARBATO, R.L.A., 1994, "Análise de sistemas estruturais de cabos de aço mediante o emprego de computador", In: Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, 15, Anais v.2, pp.1496-1501, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- BUCHHOLDT, H.A., 1985, "An introduction to cable roof structures", Cambridge University Press, 257p., Cambridge, England.

EL DEBS, A.L.H.C., 1983, "Contribuição ao estudo das coberturas pênseis com cabos-treliça", Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, SP, Brasil.

KRISHNA, P., 1978, "Cable-suspended roofs", McGraw-Hill, 314p., New York, USA.

MAJOWIECKI, M., 1985, "Tensostrutture: progetto e verifica", Cisia, Milana, Italia.

MOLLMANN, H., 1970, "Analysis of plane prestressed cable structures", *Journal of Structural Division*, ASCE, v.96, n.10, pp.2059-2082.

OSHIMA, E., 1987, "Cálculo de cabo-treliça mediante o emprego de computador", Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, SP, Brasil.

OTTO, F., 1969, "Tensile Structures - Cable Structures", vol.2, The M.I.T. Press, USA.

SÁLES, J.J., 1988, "Projeto e viabilidade econômica de coberturas pênseis com cabos-treliça", Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, SP, Brasil.

SZABÓ, J.; KOLLÁR, L., 1984, "Structural design of cable-suspended roofs", Translated from the Hungarian by M.N. Pavlovic. Chichester, Ellis Horwood.