

CÁLCULO DE CABOS-TRELIÇA
MEDIANTE O EMPREGO DE COMPUTADORES

AUTOR: ENG.^a ELIZABETH OSHIMA

ORIENTADOR: PROF.DR. ROBERTO L.DE ARRUDA BARBATO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

**CÁLCULO DE CABOS-TRELIÇA
MEDIANTE O EMPREGO DE COMPUTADORES**

ENG.^a ELIZABETH OSHIMA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Roberto L.A. Barbato

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Walter Abrahão Nimir

Prof. Dr. Dante Guelpa

SUPLENTE:

Prof. Dr. João Carlos Antunes de Oliveira e Souza

Prof. Dr. Lafael Petroni

SÃO CARLOS, OUTUBRO de 1987

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a meus amigos e familiares pelas palavras de incentivo e confiança na realização deste trabalho. Em especial, agradeço ao Prof. Barbato, amigo e orientador, principalmente por seu exemplo de integridade e seriedade profissional.

Agradeço, também, aos Profs. Ana Lúcia e Venturini pela boa vontade e atenção que sempre demonstraram, quando a eles recorri.

Agradecimentos à Silvana, à Silvinha e à Nadir pelos cuidados com a datilografia, desenhos e ordenação bibliográfica desta dissertação, à Da. Wilma pelos inúmeros auxílios e aos funcionários e professores do Departamento de Estruturas que de alguma forma influíram na boa condução deste trabalho.

Também, aos funcionários do CPD e da Secretaria de Pós-Graduação pela eficiente prestação de seus serviços, à FAPESP pelo auxílio financeiro e àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão do trabalho, muito obrigada.

Ao meu pai

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, uma análise a respeito do comportamento estrutural do cabo-treliça, visando a sua aplicação em coberturas pênseis de grandes vãos livres.

No primeiro capítulo, procura-se conceituar o cabo-treliça e ressaltar suas principais características, descrevendo-se algumas obras significativas que empregam esse sistema estrutural em suas coberturas.

No segundo capítulo, faz-se a análise do cabo-treliça mediante o emprego do processo dos deslocamentos, considerando-se carregamentos estáticos.

No capítulo seguinte, analisa-se o cabo-treliça sob a ação de carregamento dinâmico.

O quarto capítulo é dedicado a diversas aplicações numéricas, que tem a finalidade de analisar o comportamento do cabo-treliça em função da variação dos diversos parâmetros.

Finalizando, no quinto capítulo, apresentam-se algumas observações que podem servir como uma primeira indicação para elaboração de projetos desse sistema estrutural.

ABSTRACT

In this work, is presented an analysis concerning structural behaviours of cable-trusses, aiming its application on suspended roofs with large free spans.

Chapter I gives cable-trusses definition and its main characteristics, and also describes some significant constructions in which this structural system have been adopted.

In Chapter II, the cable-trusses analysis is shown using displacement process for static loads only.

In the following Chapter, the cable-truss is analysed under dynamic load action.

Chapter IV is dedicated to several numerical applications for the study of cable-truss behaviours related with several parameter variations.

Finally, Chapter V presents some observations of the cable-truss study that can give some informations for the idealization of this kind of structure.

SUMÁRIO

1. <u>INTRODUÇÃO</u>	
1.1 - GENERALIDADES.....	1.1
1.2 - APLICAÇÕES DE CABOS-TRELIÇA EM COBERTURAS....	1.4
1.3 - CONTEÚDO DO TRABALHO.....	1.22
2. <u>ANÁLISE ESTÁTICA DE CABOS-TRELIÇA</u>	
2.1 - MATRIZ DE RIGIDEZ DE UM ELEMENTO DO CABO-TRELIÇA.....	2.1
2.2 - MATRIZ DE RIGIDEZ DE UM ELEMENTO COM RESISTÊNCIA A FLEXÃO.....	2.9
2.3 - PROCEDIMENTO ITERATIVO.....	2.11
2.4 - FLUXOGRAMA.....	2.13
3. <u>ANÁLISE DINÂMICA DE CABOS-TRELIÇA</u>	
3.1 - EQUAÇÕES DO MOVIMENTO.....	3.1
3.2 - PROCEDIMENTO ITERATIVO.....	3.2
3.3 - FLUXOGRAMA.....	3.5
4. <u>EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA</u>	
4.1 - CABOS-TRELIÇA COM CARREGAMENTOS ESTÁTICOS....	4.1
4.2 - CABOS-TRELIÇA COM CARREGAMENTOS DINÂMICOS....	4.32
5. <u>OBSERVAÇÕES E COMENTÁRIOS FINAIS</u>	
5.1 - CABOS-TRELIÇA COM HASTES VERTICAIS.....	5.1
5.2 - CABOS-TRELIÇA COM HASTES DIAGONAIS.....	5.4
5.3 - CABOS-TRELIÇA COM CARREGAMENTO DINÂMICO.....	5.7
5.4 - COMENTÁRIOS FINAIS.....	5.7
APÊNDICE A: PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN PARA A ANÁLISE ESTÁTICA DE CABOS-TRELIÇA.....	A.1
APÊNDICE B: PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN PARA A ANÁLISE DINÂMICA DE CABOS-TRELIÇA.....	B.1
BIBLIOGRAFIA	

1. INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

Omitindo as grandes tendas da antiguidade - construídas com tecido de linho ou de cânhamo ou ainda com o emprego de couro - e algumas poucas obras executadas com cobertura suspensa formada por lâminas metálicas de pequena espessura, pode-se afirmar que só a partir da construção da memorável Arena de Raleigh, em 1953, que as coberturas pênseis, na sua forma atual, começaram a ser empregadas com maior frequência. Consideradas como das mais indicadas para as grandes áreas livres, as coberturas pênseis - compostas essencialmente por uma estrutura portante de cabos e por elementos de vedação que nela se apóiam - têm sofrido nas últimas décadas grande evolução e, cada vez mais, vêm despertando o interesse de pesquisadores, de engenheiros, de arquitetos e de todos os profissionais ligados à construção civil.

Deste modo, surgiram diversos sistemas de coberturas pênseis, dentre os quais se destaca o idealizado pelos engenheiros Zetlin e Jawerth conhecido por "cabo-treliça". Neste sistema, dois cabos de curvaturas opostas são conectados por tirantes ou hastes verticais ou inclinados, de modo a formar uma treliça plana de banzos não paralelos. Denomina-se, usualmente, cabo portante o cabo com concavidade

para cima, e o outro com concavidade para baixo é comumente chamado cabo tensor. Na figura 1.1 apresentam-se as formas fundamentais de cabos-treliça.

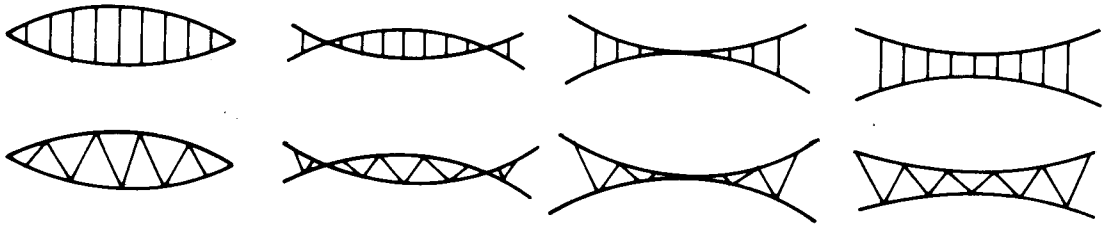


FIG. 1.1

À treliça assim constituída imprime-se um estado prêvio de tração, ou por meio de um dos cabos (geralmente o tensor) ou por meio das hastes de ligação - como indica a figura 1.2 - de forma que, mesmo para as combinações mais desfavoráveis das ações, o conjunto de cabos e hastes não seja destracionado.

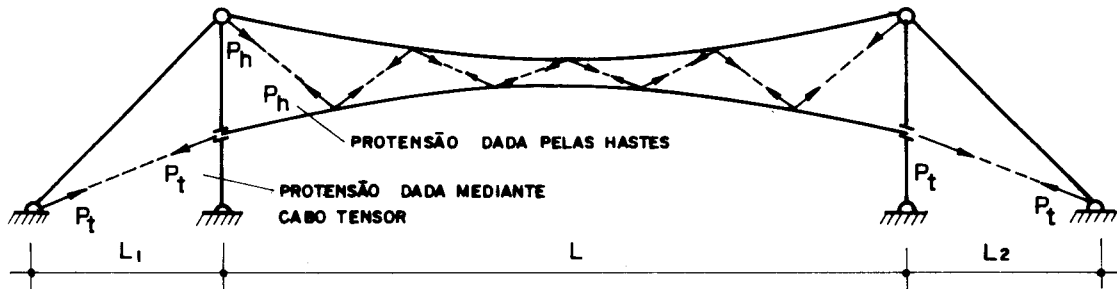


FIG. 1.2

Obtêm-se assim uma estrutura protendida de cabos extremamente rígida que permite o emprego de vedação leve e que, além disso, apresenta excelente desempenho estrutural mesmo quando se consideram as vibrações oriundas de estímulos dinâmicos intermitentes.

Os cabos-treliça, formando uma sequência de pôrticos aplicam-se a coberturas de edifícios de planta retangular como mostra o esquema da figura 1.3. Para a cobertura de planta circular, pode-se dispor os cabos-treliça radialmente e fixá-los em dois anéis concêntricos, como ilustra a figura 1.4.

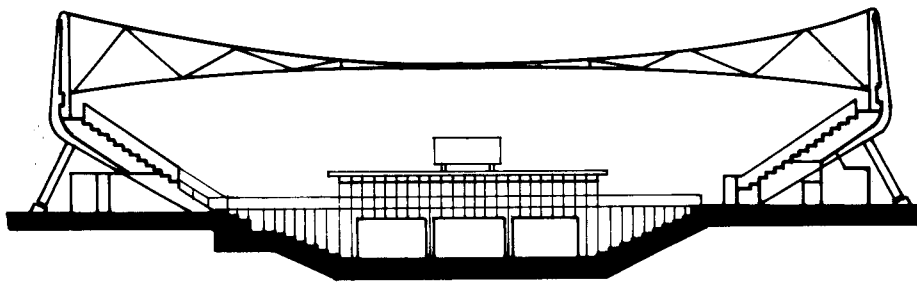
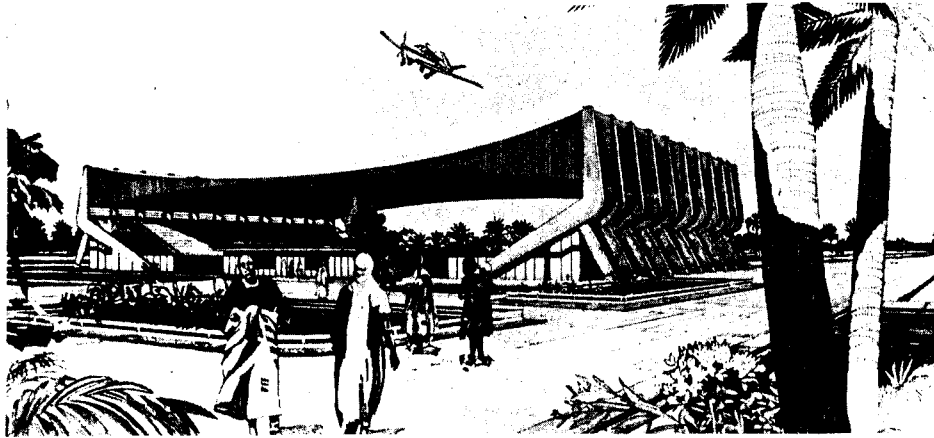


FIG.1.3 - PALÁCIO DE ESPORTES
SOKOTO (NIGÉRIA)

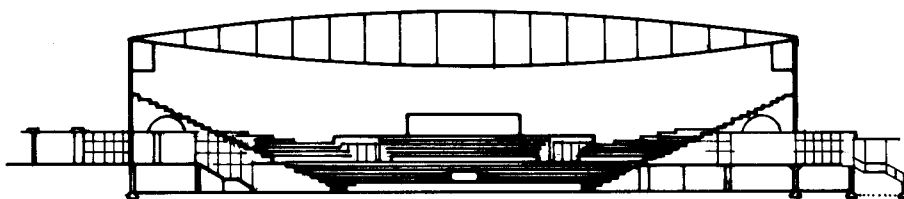
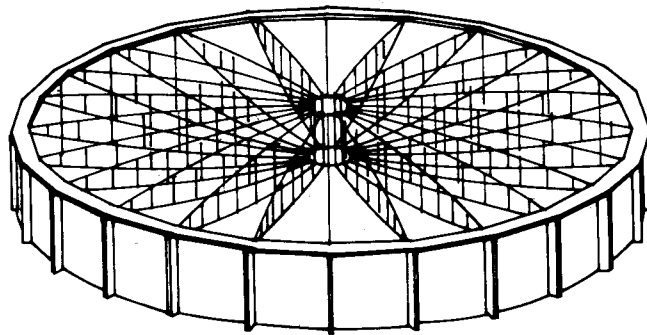


FIG.1.4- AUDITÓRIO EM UTICA- NEW YORK (EUA)

Os cabos-treliça são montados no solo de acordo com gabaritos previamente determinados em projeto, e depois elevados e unidos às estruturas de apoio. Em seguida, aplica-se a força de protensão definida no projeto, após o que é colocado o sistema de vedação sem a necessidade do emprego de formas e escoramentos.

Os cabos-treliça, portanto, demonstram ter grande adaptabilidade às exigências arquitetônicas, além de apresentar vantagens como a facilidade de montagem, com a consequente diminuição do tempo de execução e custo da obra. Devido às características de estrutura simples, leve, versátil e econômica, os cabos-treliça têm um vasto campo de aplicação, tais como na cobertura de ginásios de esportes, estádios, piscinas, supermercados, depósitos, fábricas, igrejas, teatros, pavilhões de exposição, feiras, aeroportos, terminais rodoviários, ferroviários e marítimos e outras construções.

Para melhor fixar as idéias até aqui apresentadas, descrevem-se a seguir algumas obras construídas com o emprego do cabo-treliça.

1.2 - APLICAÇÕES DE CABOS-TRELIÇA EM COBERTURAS

1.2.1 - Teatro ao Ar Livre em Otigheim (Suécia)

Construído em 1961 em Otigheim na Suécia, o teatro (figura 1.6) foi projetado para abrigar 3850 espectadores. Procurava-se um sistema estrutural leve e de alta estabilidade, que fosse aplicável a coberturas de grande porte e tivesse bom desempenho frente às duras condições climáticas do país tais como diferenças de temperatura ao longo do ano de até 60°C, carregamentos contínuos de neve durante quase 6 meses e ventos de grandes velocidades.

A cobertura construída é formada por 36 cabos-treliça, dos quais 12 são paralelos e têm vão de 40m e 24 são não paralelos e com vãos variáveis entre 20 e 27,5m, como

indica a figura 1.5. Os apoios externos são maciços de concreto armado e os apoios internos são formados por duas vigas, também de concreto armado, com seção transversal de $3,60 \times 0,30\text{m}^2$. As referidas vigas têm 38m de comprimento e são apoiadas em dois pilares de concreto armado.

Como vedação empregaram-se telhas de aço galvanizadas e diretamente fixadas aos cabos portante.

Para garantir a estanqueidade e melhorar as condições acústicas e térmicas da área coberta, as telhas de aço foram revestidas com mantas de material isolante e impermeável.

A área coberta é de aproximadamente 2.200m^2 .

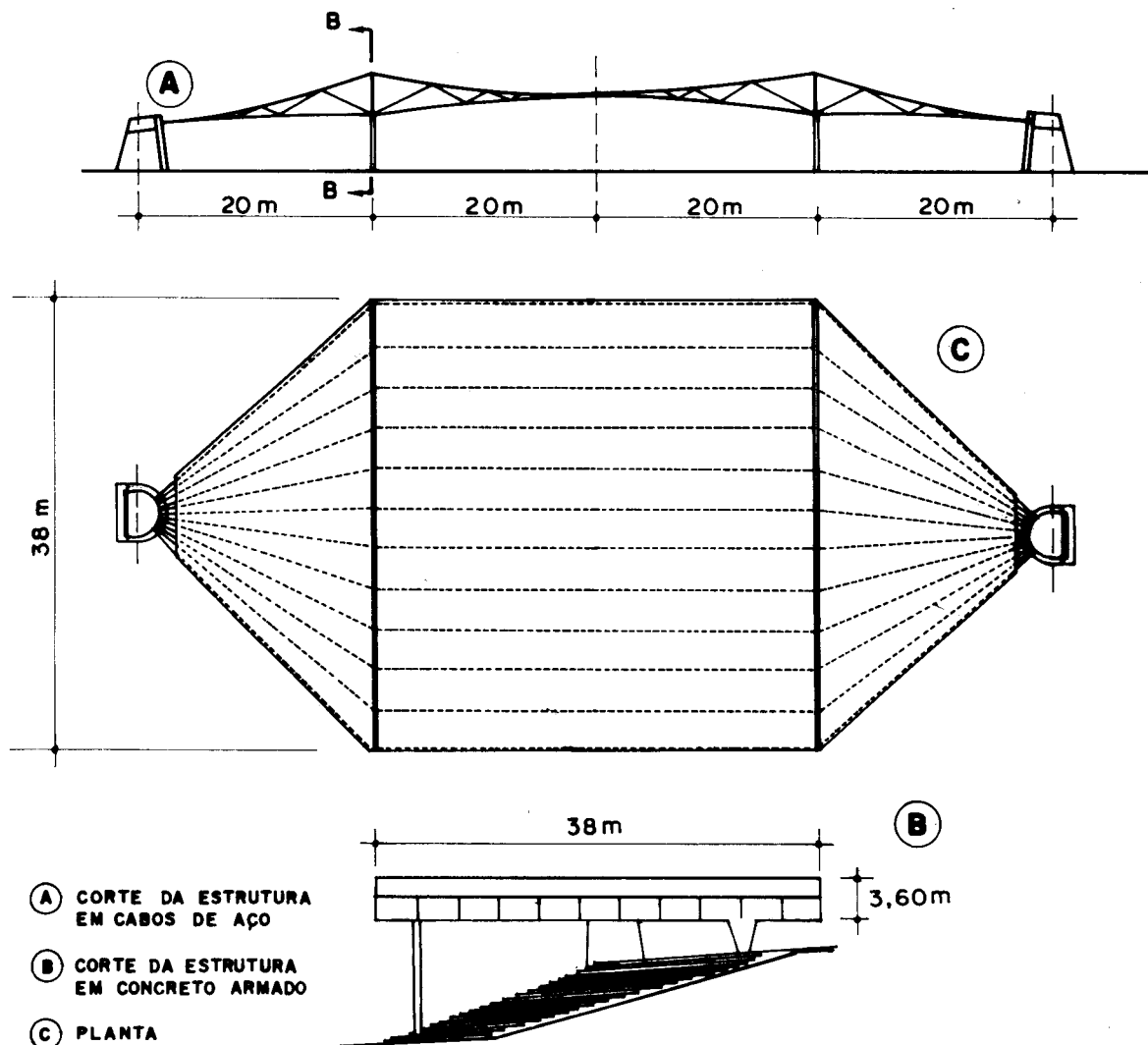


FIG. 1.5

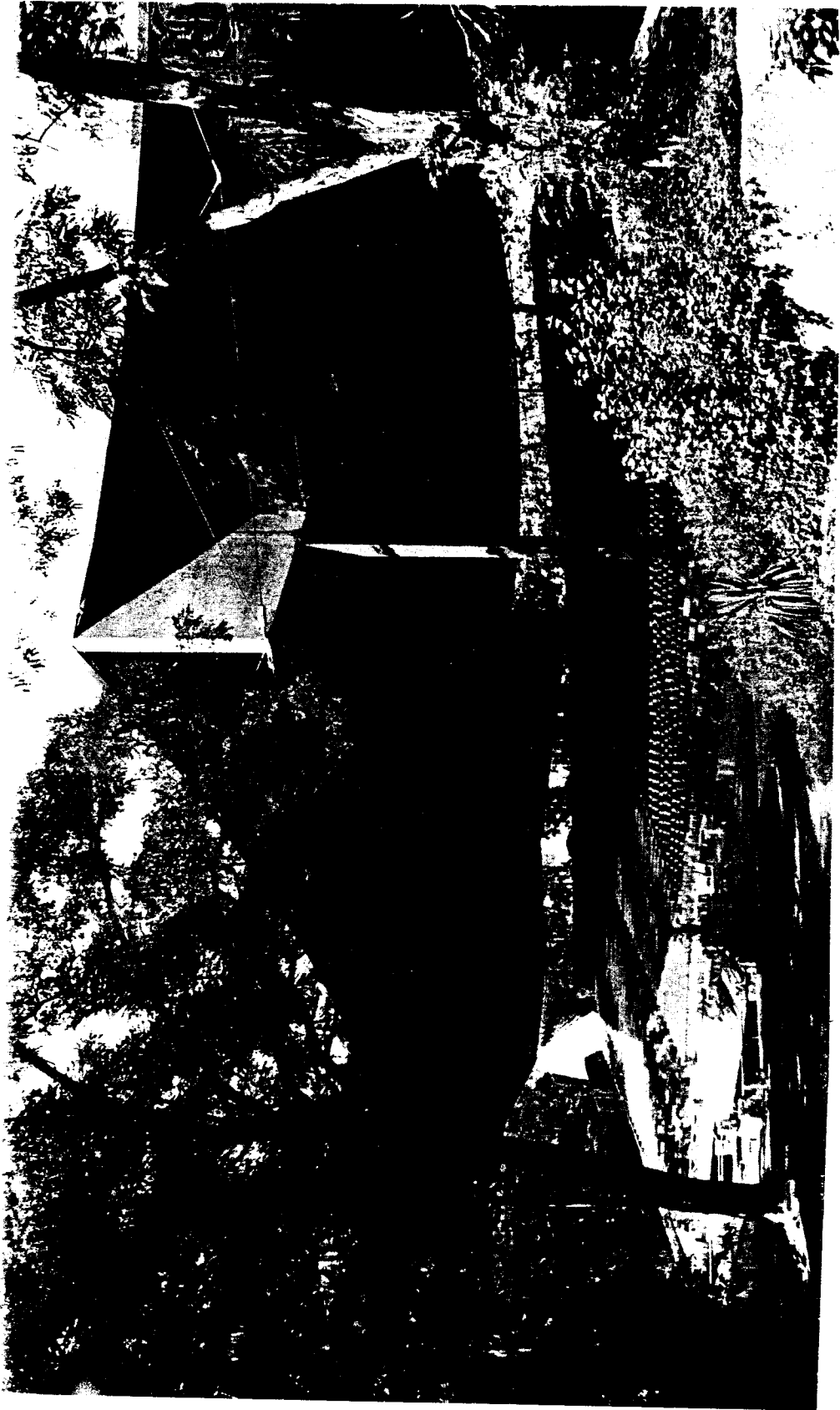


FIG. I.6 — TEATRO EM OTIGHEIM (SUÉCIA)

1.2.2 - Fábrica em Lesjofors (Suécia)

A cobertura da fábrica em Lesjofors na Suécia, figura 1.9, construída em 1959 é uma das primeiras obras projetadas utilizando o cabo-treliça. A estrutura com 80m de vão livre é composta de 5 segmentos de 16m de vão, e fixada em dois pilares articulados e atirantados em fundações por gravidade, conforme indica a figura 1.7.

Os cinco segmentos de cabo-treliça são interligados por uma viga metálica treliçada, que também tem a finalidade de garantir o contraventamento transversal da cobertura.

Como elementos de vedação empregaram-se chapas de alumínio fixadas diretamente aos cabos portantes.

Para melhorar as condições ambientais da fábrica, a face interna das chapas de alumínio foram revestidas com mantas de lã de vidro.

A iluminação interna foi garantida pela colocação de nove lanternins espaçados a cada 8 metros e fixados aos cabos por meio de um treliçado metálico.

Para a construção da estrutura, que pesa da ordem de 15Kgf/m^2 , e que cobre 2.000m^2 , foram empregados 2100m de cabos de aço com 1,7cm de diâmetro.

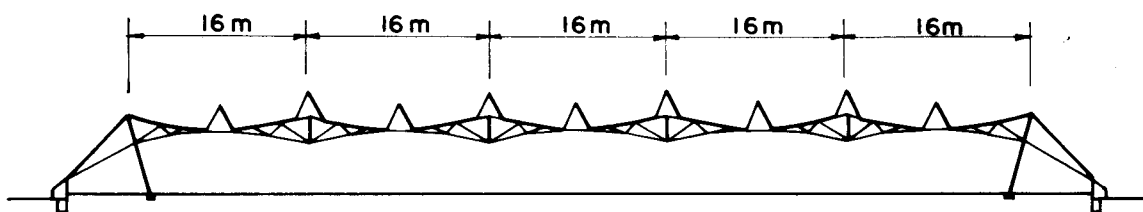


FIGURA 1.7

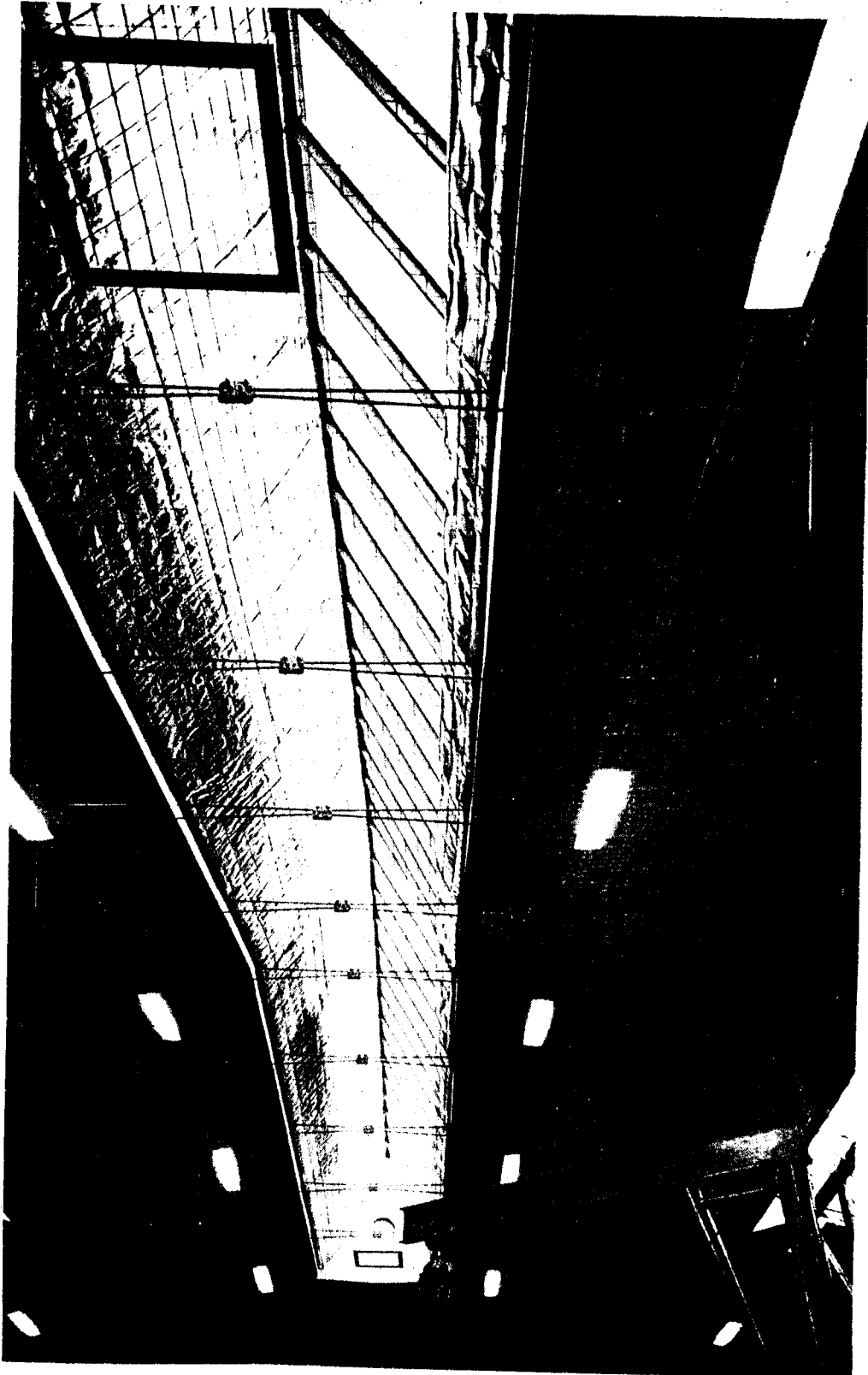


FIG. 1.8 - Aspecto interior da fábrica

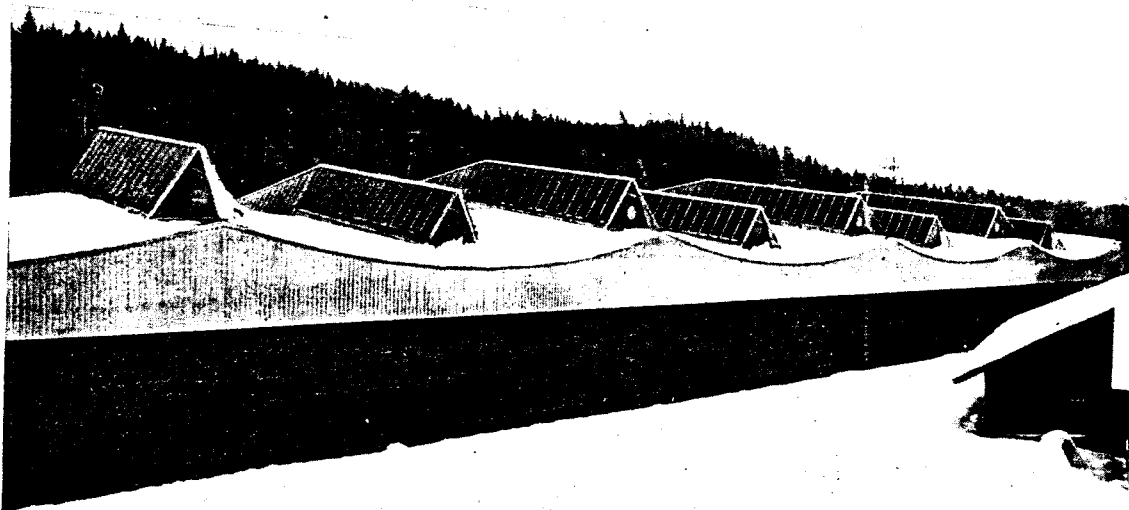


FIG. 1.9 - FÁBRICA EM LESJOFORS (SUÉCIA)

1.2.3 - Centro Comercial em Athis-Mons (França)

O centro comercial de Athis-Mons, próximo de Paris, engloba um supermercado, boutiques e um parque de estacionamento.

A principal característica estrutural do empreendimento é a cobertura do supermercado, composta por 17 cabos-treliça (figura 1.10), com 44m de vão, espaçados de 3m, e fixados em pilares metálicos articulados na fundação e atirantados em blocos enterrados de concreto armado (figuras 1.16 e 1.17).

A protensão do cabo-treliça foi introduzida por meio das hastes diagonais, formadas por barras de aço de seção transversal circular e conectadas aos cabos principais por conexões como as mostradas na figura 1.13.

Como vedação empregaram-se telhas de aço galvanizadas e nervuradas (figura 1.15). Após a sua fixação nos cabos portantes, as telhas foram revestidas por mantas asfálticas para melhorar as condições de conforto térmico e acústico da área coberta.

Para facilitar o escoamento das águas pluviais, a cobertura foi construída com dupla curvatura reversa, obtida por meio da variação da altura dos pilares de apoio dos cabos (figura 1.18). A área coberta total é de 2.200m².

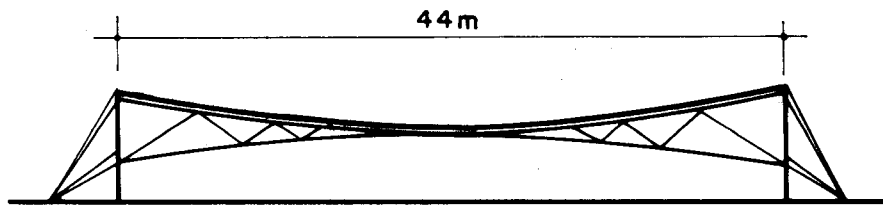


FIG. I. 10

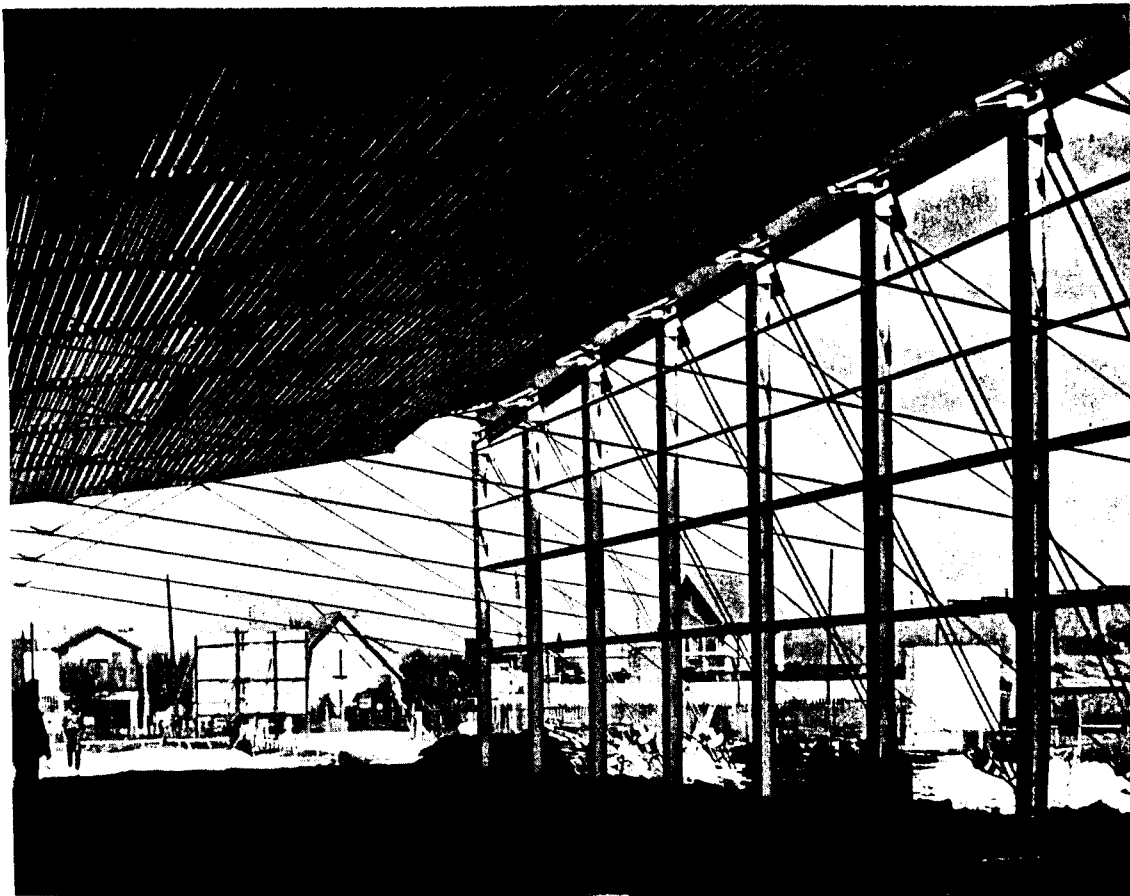


FIG. I. 11-Aspecto interior antes da colocação da vedação lateral

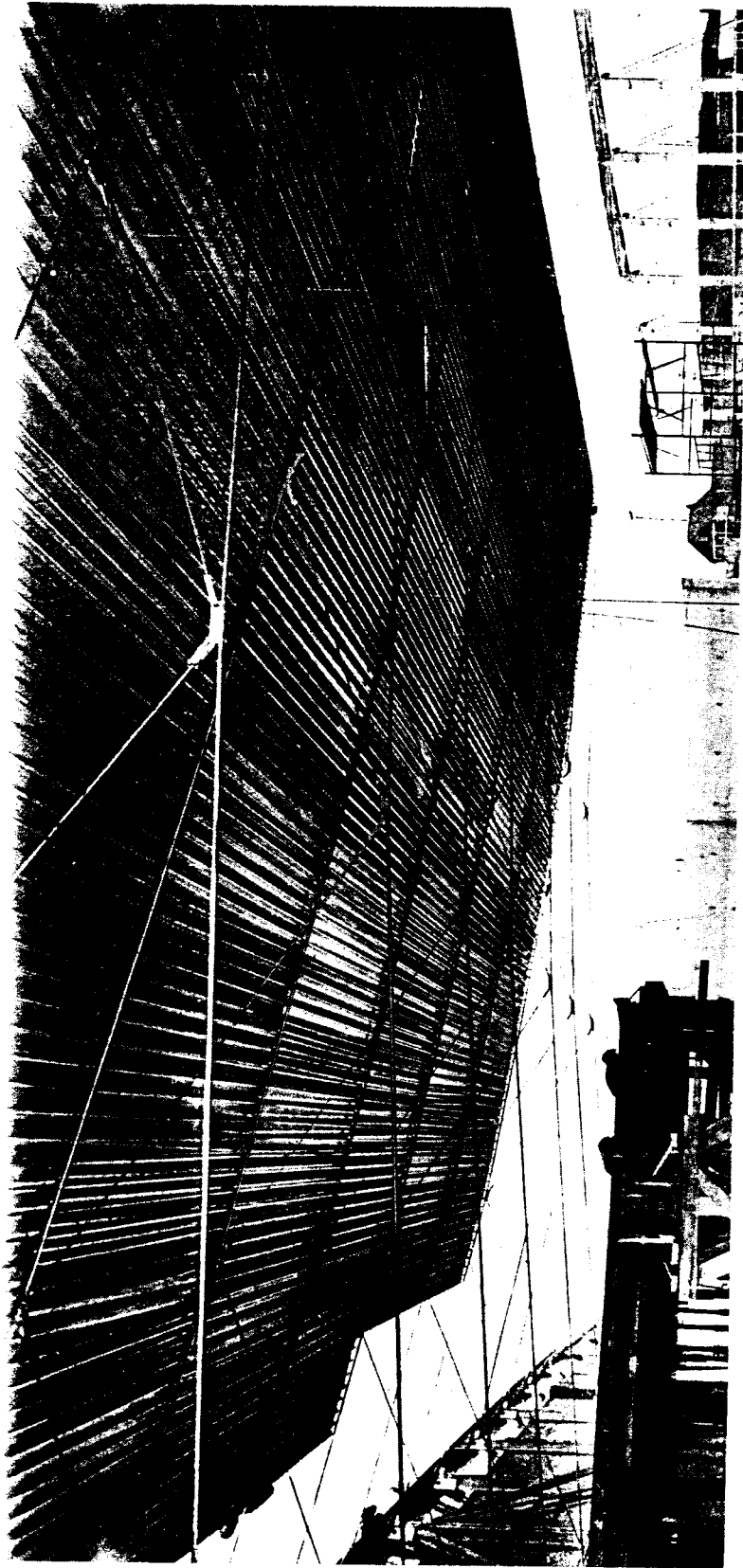


FIG.1.12-Fase de colocação das telhas metálicas

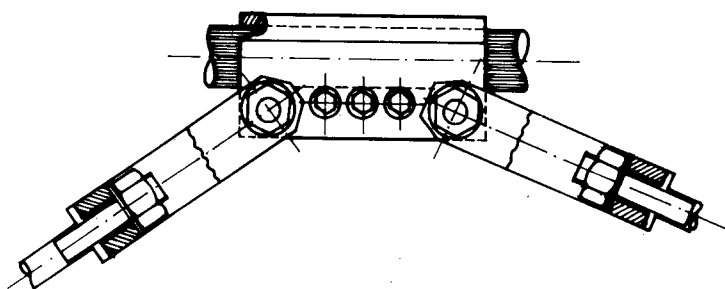


FIG.1.13- Detalhe da peça de conexão dos cabos

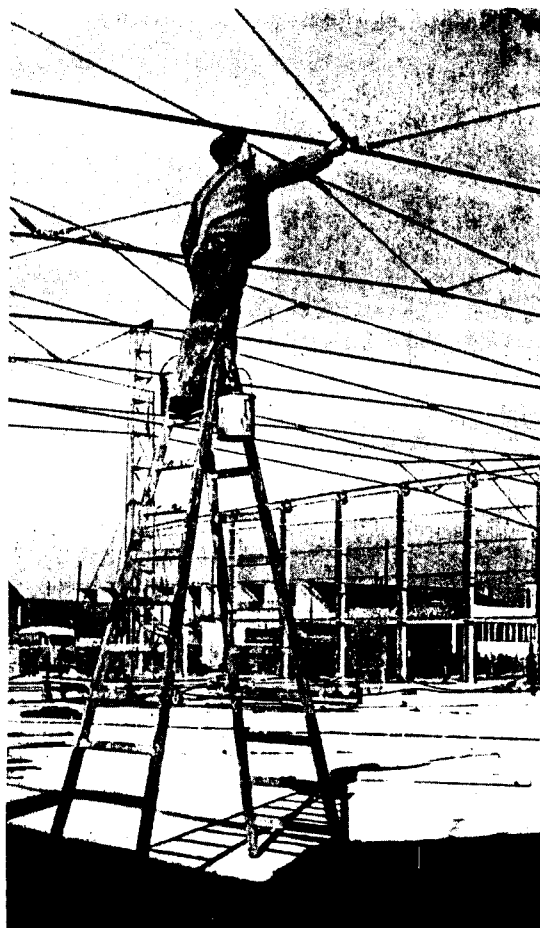


FIG.1.14- Fase de ajuste das hastes de ligação



FIG. 1.15- Detalhe das telhas metálicas antes da aplicação do material isolante e impermeabilizante

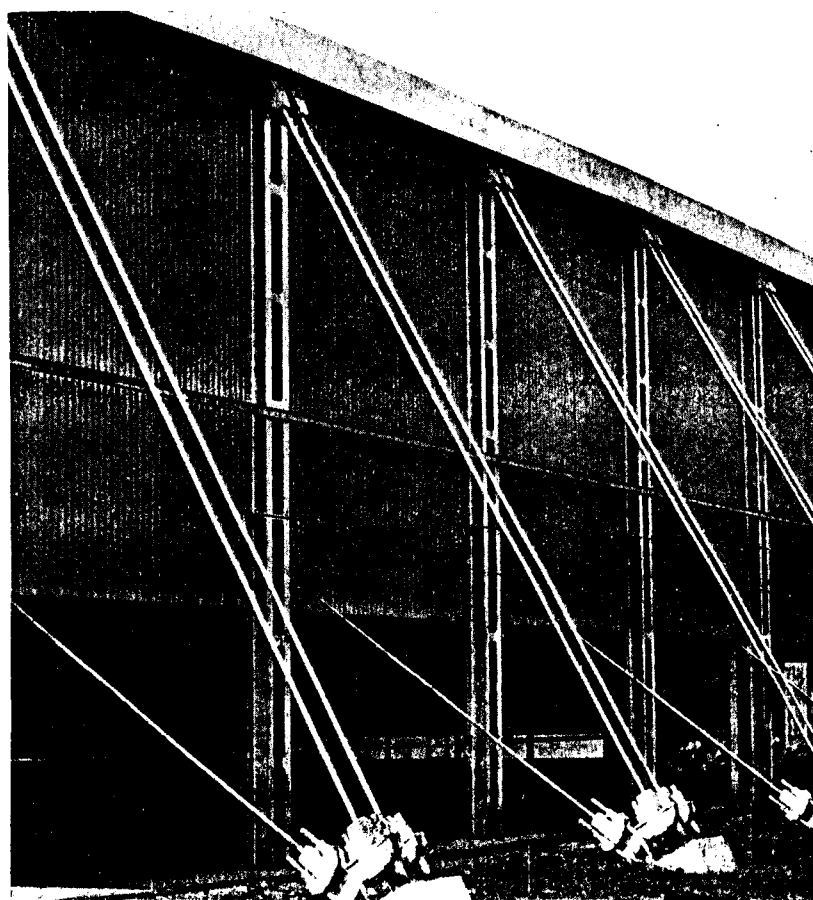


FIG. 1.16- Detalhe dos tirantes e vista da fachada lateral

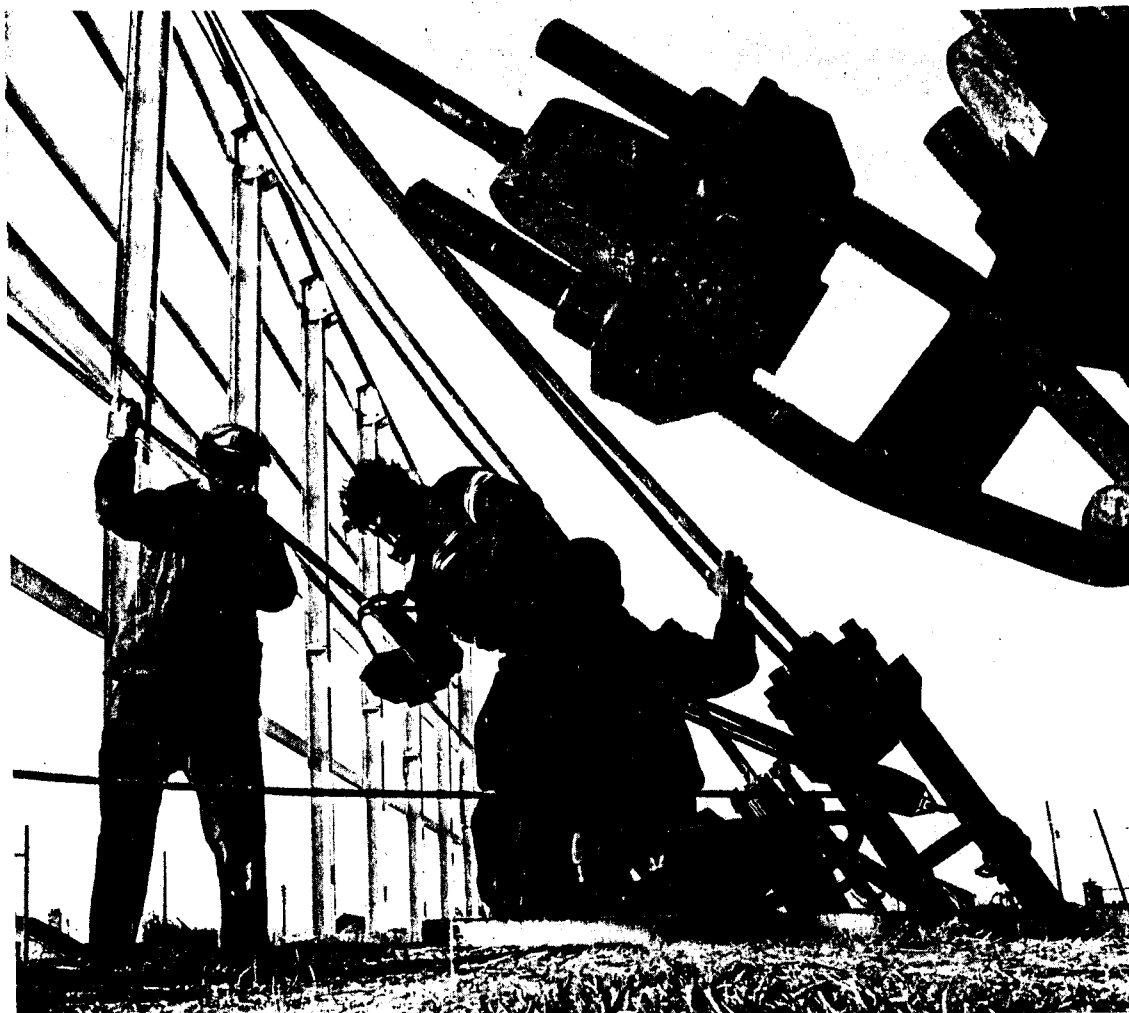


FIG. 1.17- Detalhe da ancoragem dos cabos

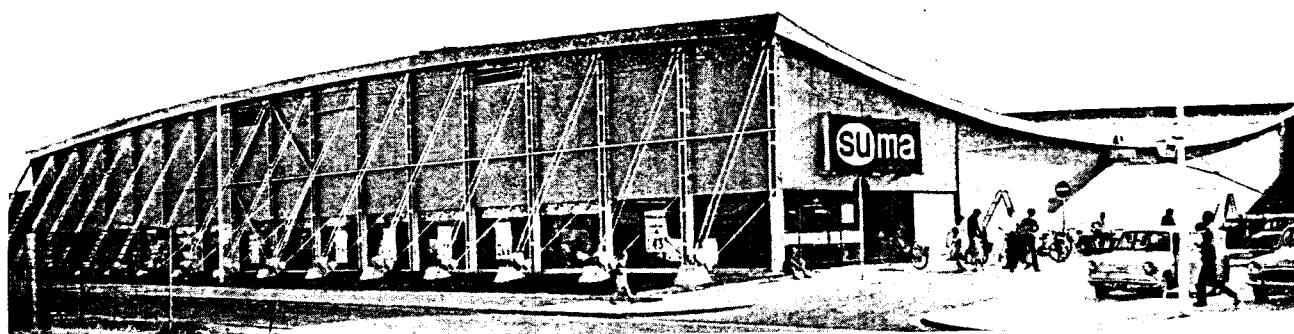


FIG. 1.18 - Fachada principal do supermercado

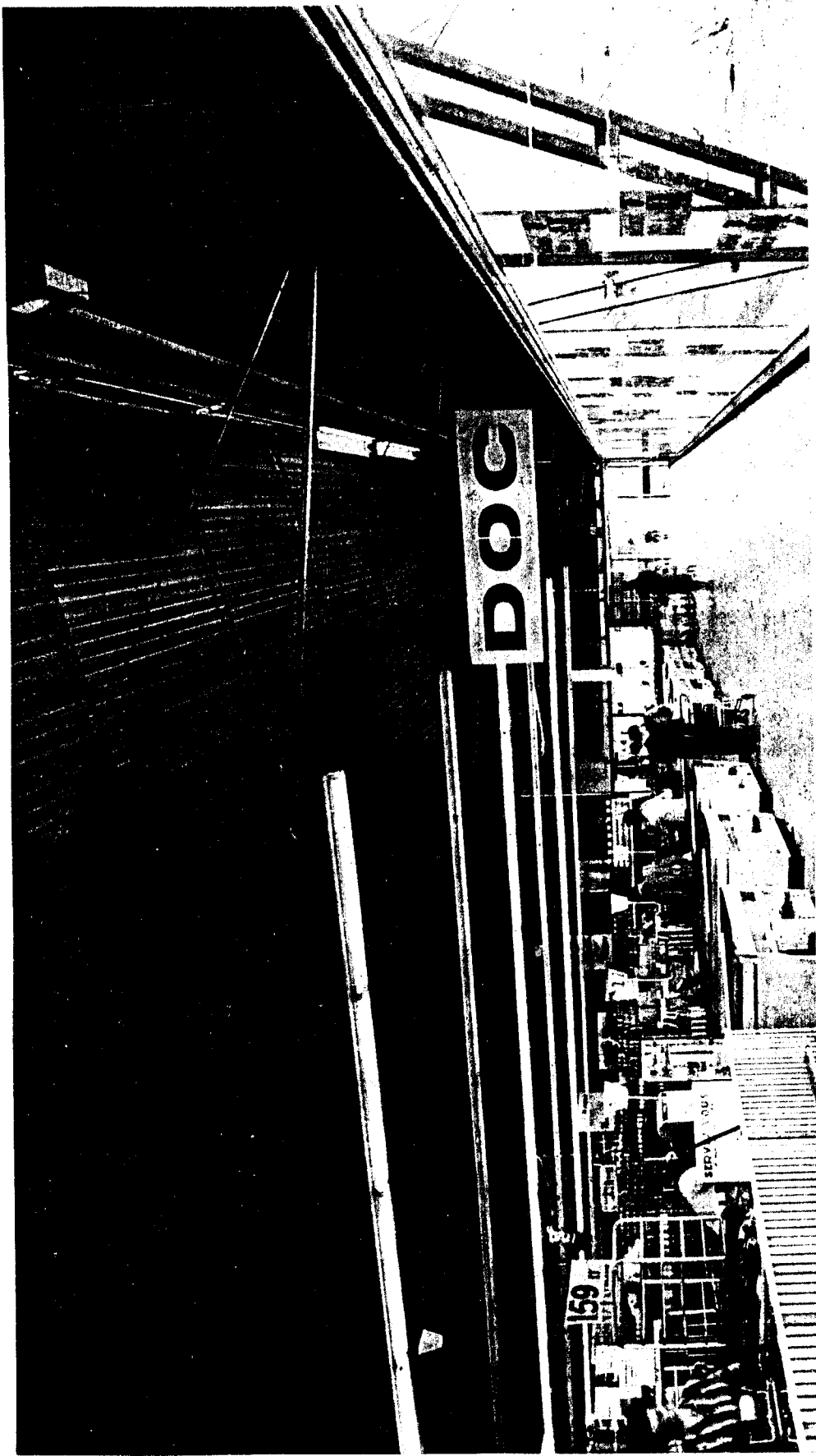


FIG.1.19 - Aspecto interior de supermercado

1.2.4 - Central de Frete Aéreo em Schiphol (Holanda)

A cobertura do hangar da cidade de Schiphol, figura 1.29, foi construída com o emprego de 34 cabos-treliça, espaçados de 4,70m e com vãos de 77m, como indica a figura 1.20.

Foram empregados cabos de aço galvanizados com diâmetros de 4,8cm (cabo-portante) 3,06cm (cabo-tensor) e 1,6 cm (hastes de ligação).

Os pilares que servem de apoio para os cabos-treliça foram executados em concreto armado e aço e atirantados nas estruturas laterais de concreto armado (figura 1.27).

A protensão do cabo-treliça foi introduzida pelo cabo portante (95 tf) e pelo cabo tensor (29tf). Após a colocação da vedação, a protensão aplicada foi ajustada por meio das hastes diagonais de ligação.

Como vedação empregaram-se placas de madeira revestidas com tecido impermeável e fixadas aos cabos portante por meio de caixilhos de aço galvanizados.

A área coberta é de aproximadamente 12.000m^2 .

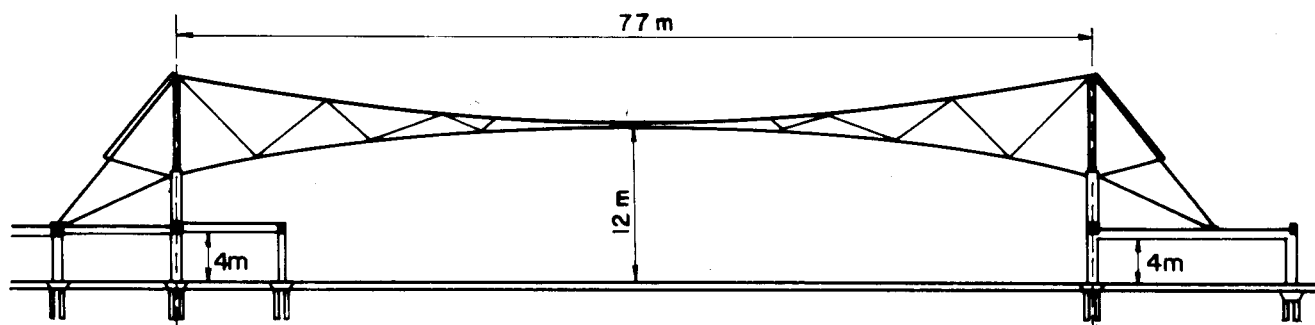


FIG. 1.20

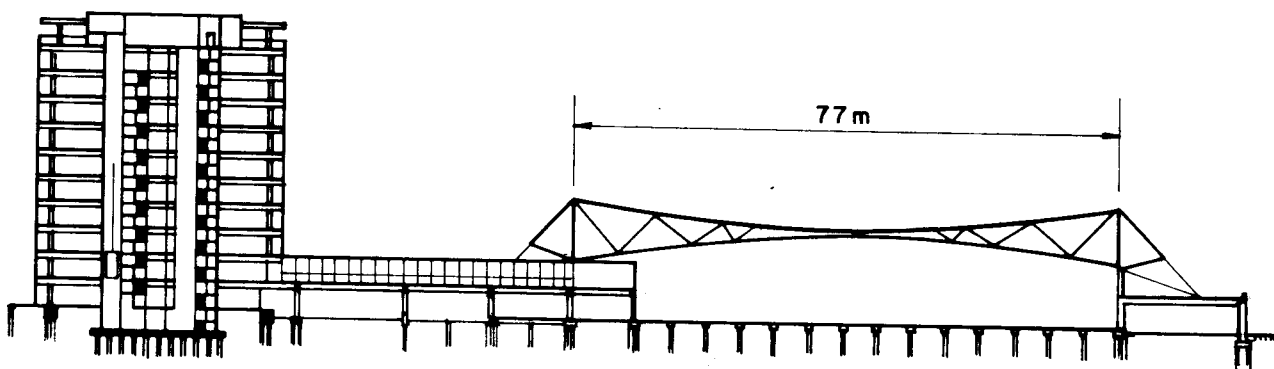


FIG. I.21 - CORTE TRANSVERSAL

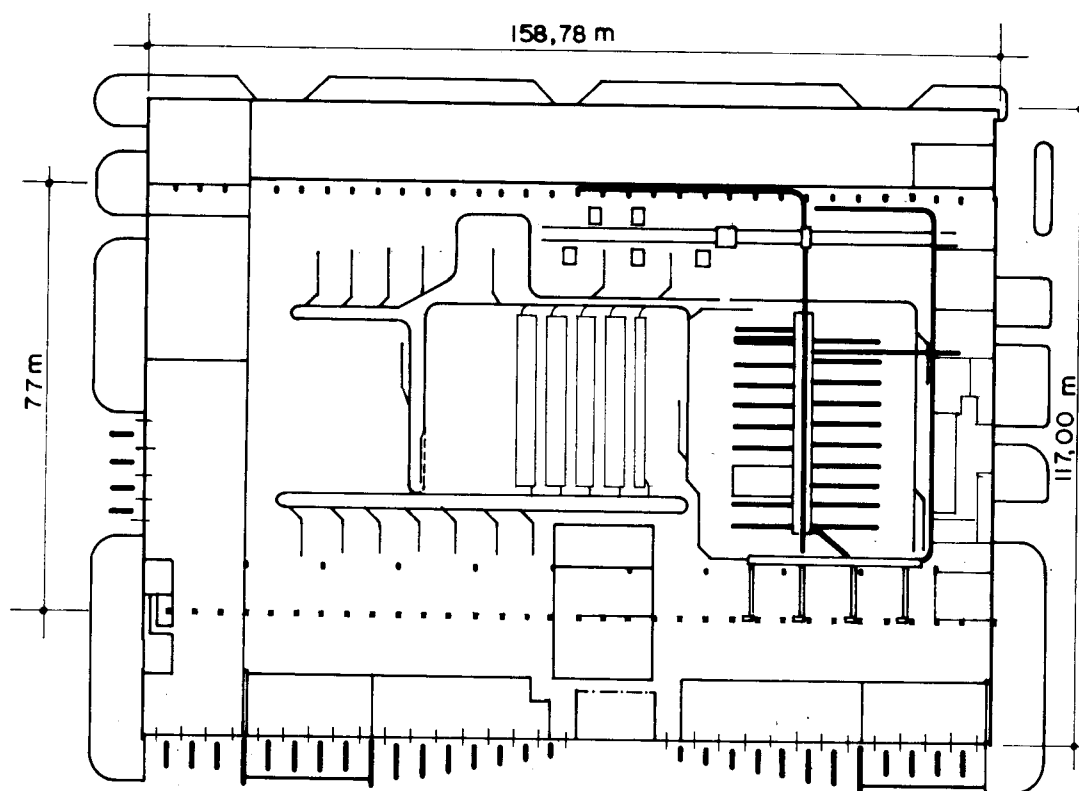


FIG. I.22 - PLANTA DA CENTRAL DE FRETE

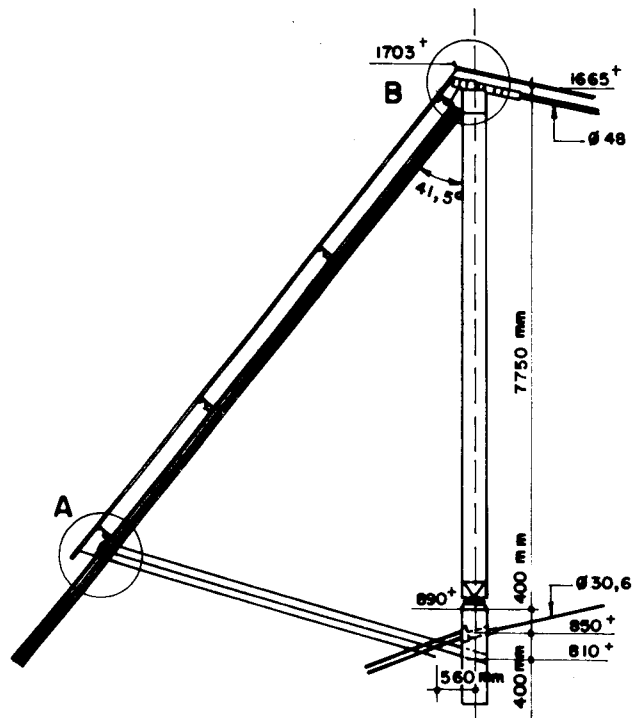


FIG. 1.23

Detalhe da coluna metálica (estrutura de apoio do cabo-treliça)

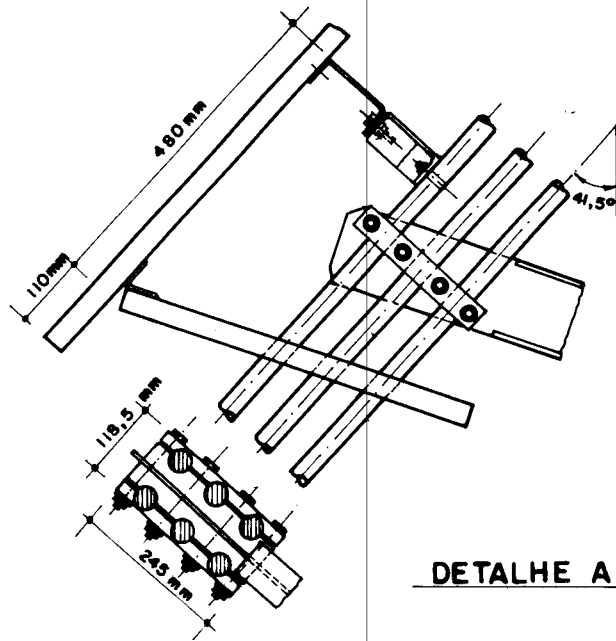


FIG. 1.24

Detalhe dos 6 tirantes e a peça de revestimento

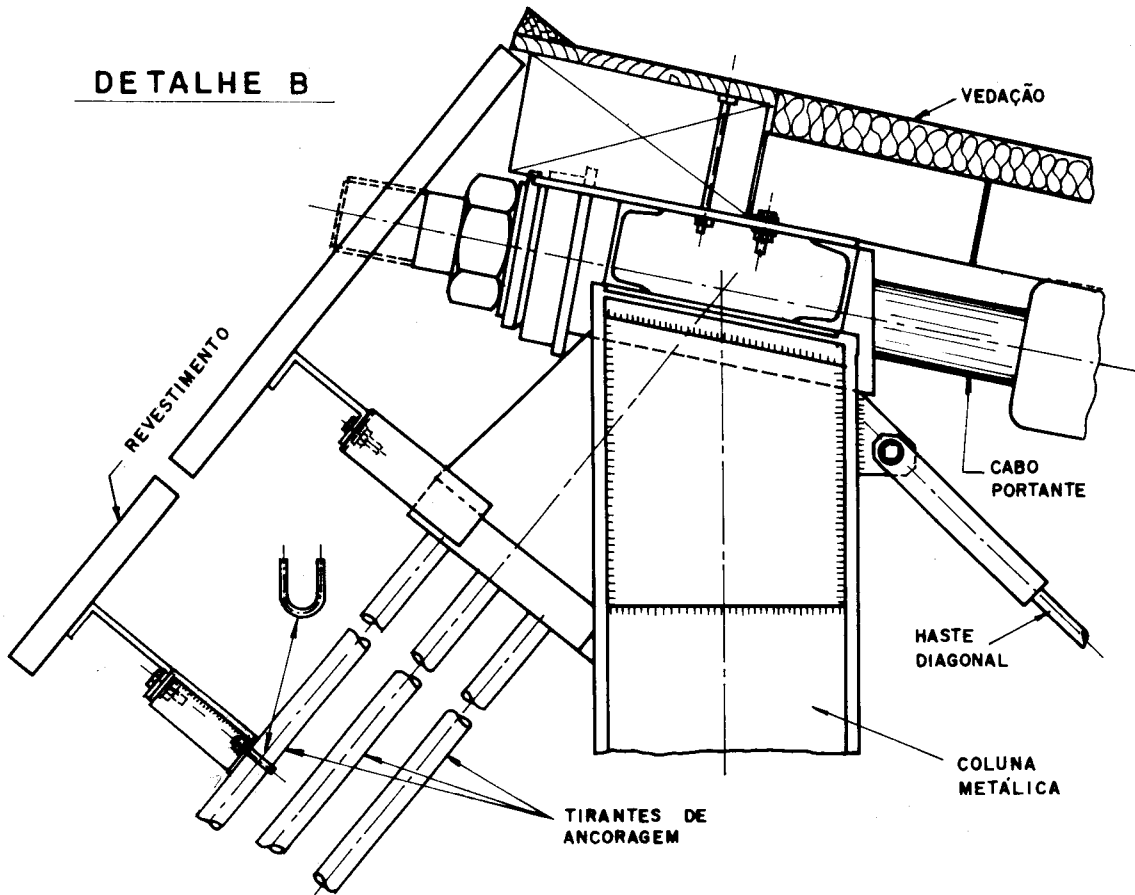


FIG. 1.25

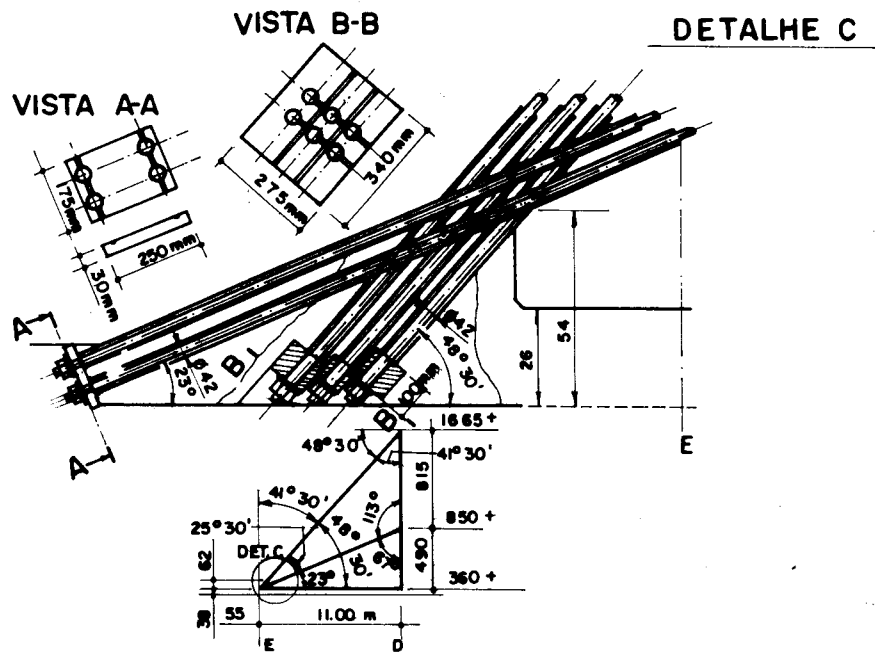


FIG. 1.26



FIG. I. 28

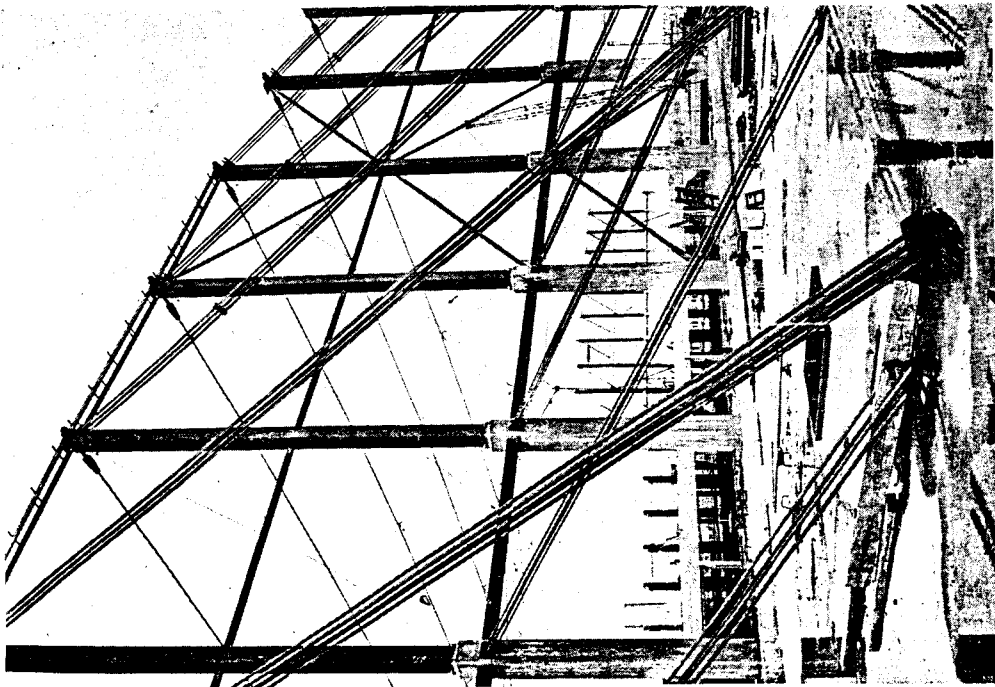


FIG. I. 27

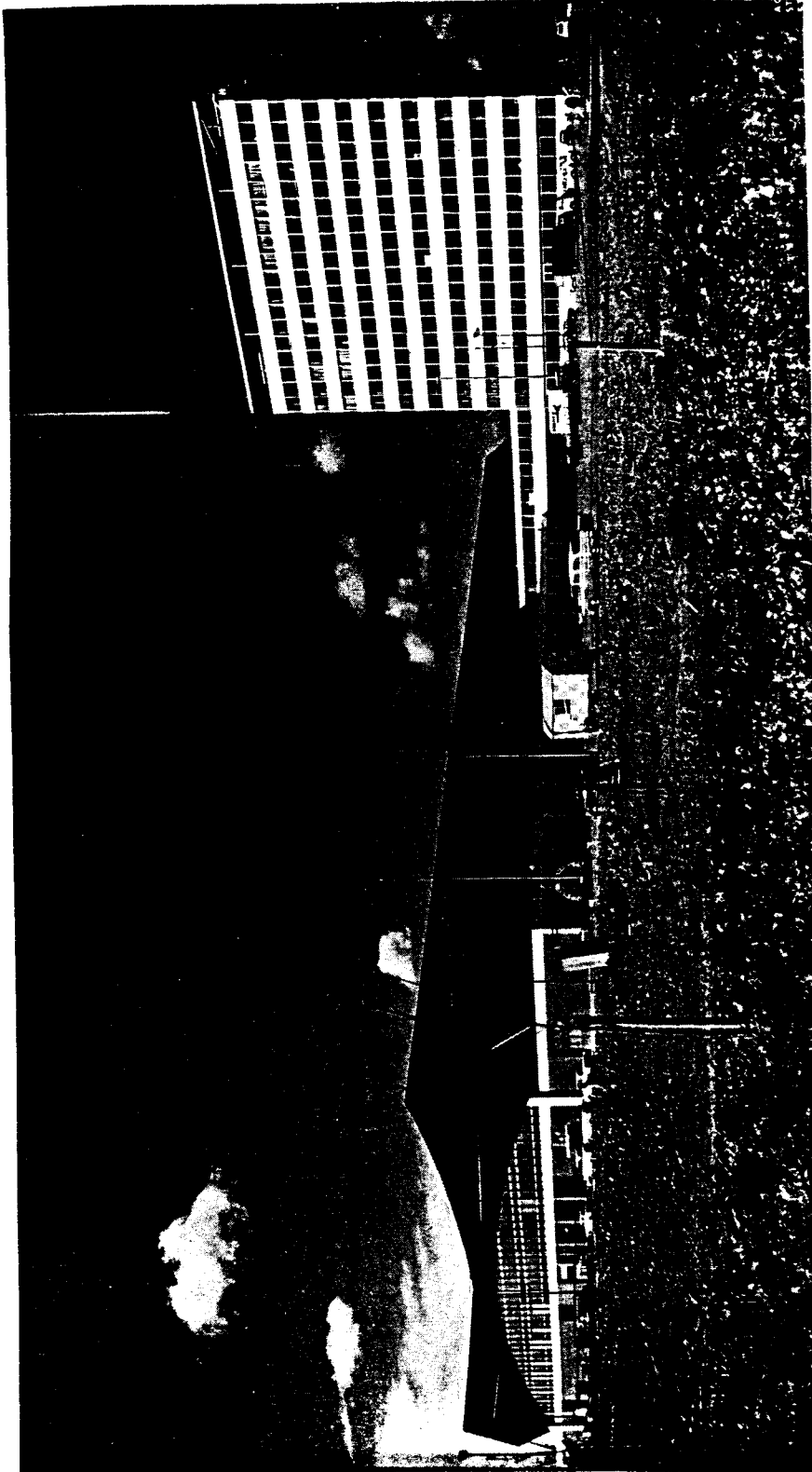


FIG. 1.29 — CENTRAL DE FRETE AÉREO EM SCHIPHOL (HOLLANDA)

1.3 - CONTEÚDO DO TRABALHO

Após os itens iniciais desse primeiro capítulo, onde foram expostos os conceitos básicos, as características gerais e possibilidades de aplicação dos cabos-treliça, faz-se a descrição do conteúdo dos capítulos seguintes do presente trabalho.

No segundo capítulo desenvolve-se a formulação para a análise estática do cabo-treliça. Sabe-se que as estruturas pênseis, comumente empregadas em coberturas sofrem, em geral, deslocamentos apreciáveis quando submetidas a carregamentos externos. Assim sendo, qualquer processo utilizado na sua análise deve considerar a não linearidade geométrica decorrente destes grandes deslocamentos.

Atualmente existem dois modelos para a análise destas estruturas. O primeiro modelo, conhecido como meio contínuo, consiste em admitir os tirantes e hastes de ligação como um diagrama contínuo, ignorando suas deformações axiais. O segundo modelo, utilizado neste trabalho, é chamado modelo discreto e consiste em admitir a estrutura formada por um número finito de elementos conectados por nós. Através desta segunda abordagem, pode-se avaliar a influência do espaçamento, da rigidez e da inclinação dos tirantes de ligação, assim como a deformação dos mesmos.

A estrutura assim concebida pode ser calculada pelo processo dos deslocamentos para estruturas de comportamento não linear, que juntamente com a álgebra matricial tornam a análise dos cabos-treliça particularmente apropriada para o emprego do computador.

São considerados os efeitos da não linearidade geométrica, mas admite-se a linearidade física. É prevista a ação simultânea de forças concentradas aplicadas aos nós e forças distribuídas aplicadas ao longo do comprimento do cabo.

No final deste segundo capítulo é fornecido o fluxograma para a análise estática do cabo-treliça. O correspondente programa, codificado em linguagem FORTRAN, para o computador IBM-370 é listado integralmente no apêndice A.

No terceiro capítulo analisa-se o cabo-treliça considerando-se os efeitos das vibrações geradas pelos carregamentos dinâmicos. Introduce-se, a equação do movimento oscilatório e apresenta-se o procedimento iterativo e incremental para a sua resolução. O fluxograma específico para a análise das respostas às solicitações dinâmicas é apresentado em seguida e o respectivo programa para computador, também em linguagem FORTRAN, para o IBM-370, encontra-se no apêndice B.

O quarto capítulo é dedicado à análise do comportamento do cabo-treliça, visando a obter indicações gerais para a elaboração de projetos desse sistema estrutural. Utilizando-se dos programas desenvolvidos, quantificou-se o desempenho dos cabos-treliça com várias formas de conexão entre os cabos principais e submetidos a diversos tipos de carregamentos. Analisou-se a influência de parâmetros, tais como, posição e número das hastes de ligação verticais ou inclinadas, distâncias máxima e mínima entre os cabos principais, intensidade e forma de aplicação da força de protensão, valor inicial das flechas dos cabos portante e tensor e também a influência dos carregamentos assimétricos.

O capítulo seguinte, o quinto, contém algumas conclusões obtidas da análise de resultados do capítulo anterior, que indicam algumas diretrizes básicas a serem observadas no projeto e execução de coberturas pênseis. Finalizando, propõem-se questões interessantes a serem investigadas em pesquisas posteriores, para um estudo mais completo e detalhado do cabo-treliça.

. BIBLIOGRAFIA

1. BARBATO, R.L.A. Sobre o comportamento dos cabos de coberturas pênseis. São Carlos, EESC-USP, 1972. 82 p. (Dissertação de Mestrado)
2. BENUSSI, F. & JURINA, L. Un particolare tipo di tensos truttura smontabile: a special type of disassembling prestressed cable structure. Costruzioni Metalliche, 34 (6), nov.-dic. 1982.
3. BREBBIA, C.A. & FERRANTE, A.J. Computational methods for the solution of engineering problems. 2 ed. London, Pentech, 1978.
4. DEBS, A.L.H.C. Contribuição ao estudo das coberturas pênseis com cabos-treliça. São Carlos, EESC-USP, 1983. (Dissertação de Mestrado).
5. DINKELAAR, C.H. Le centre de fret aérien à Schiphol (Pays-Bas). Acier-Stahl-Steel, 33(4): 169-75, 1968.
6. GEHRON & SELTZER Toiture suspendue d'un auditorium municipal a New York. L'Architecture d'Aujourd Hui, 32 (99): 61-63, dec. 1961, jan. 1962

7. GESCHWINDNER JR., L.F. & WEST, H.H. Parametric investigations of vibrating cable networks. Journal of the Structural Division, ASCE, 105 (ST3): 465-79, Mar. 1979.
8. GRAVEREAUX, R. et alii. Centre commercial d'Athis-Mons, près de Paris. L'Architecture d'Aujourd'Hui, 32 (99): 96-99, déc. 1961, jan. 1962.
9. IRVINE, H.M. Free vibrations of inclined cables. Journal of the Structural Division, ASCE, 104 (ST2): 434-7, Feb. 1978.
10. JAWERTH, D. Structures tendues en cables d'acier. L'Architecture d'Aujourd'Hui, 32 (99): 94-95, déc. 1961, jan. 1962.
11. KRISHNA, P. et alii. Performance of cable trusses under static loads. Journal of the Structural Division, ASCE, 108 (ST1): 265-83, Jan. 1982.
12. LEV ZETLIN: recherches et réalisations aux États-Unis. L'Architecture d'Aujourd'Hui, 32 (99): 60, déc. 1961, jan. 1962.
13. MAIER, G. Le tensostrutture: uno sguardo allo stadio attuale di sviluppo. Costruzioni Metalliche, 15 (4): 180-87, iug-ago. 1963.
14. MAJOWIECKI, M. Les tensostrutture de l'agence Fiat à San Giovanni in Persiceto (Bologne-Italie). Acier-Stahl-Steel, 37 (12), 1972.
15. MAJOWIECKI, M. Tensostrutture de grandes portées en Italie. Acier-Stahl-Steel, 39 (12): 499-502, 1974.

16. MAJOWIECKI, M. Tensostrutture: progetto e verifica.
Milano, Acciaco, 1985. 335p.
17. MATILDI, P. et alii. Indagine sperimentale sulle trave
vate piane di funi ad elementi di collegamento verti
cali. Nota III: Esame della "risposta" della travata
al variare dell'entità degli sforzi di pretensione.
Costruzioni Metalliche, 25 (6): 391-406, nov-dic.
1973.
18. MØLLMANN, H. The analysis of shallow cables. Bygnin
gsstatistiske Meddelelser, 41 (3), 1970.
19. MØLLMANN, H. Analysis of plane prestressed cable
structures. Journal of the Structural Division,
ASCE, 96 (ST10): 2059-82, Oct. 1970.
20. MØLLMANN, H. Analysis of hanging roofs by means of
the displacement method. Lyngby, Polyteknisk For-
lag, 1974.
21. MOSCO, V. Toitures sur câbles de grande portée: les
palais des sports de Kano et Sokoto(Nigeria). Acier-
-Stahl-Steel, 42 (10): 341-47, 1977.
22. MOTE, S.H. Nonlinear vibration of cable trusses.
Chicago, Illinois Institute of Technology, 1975.
52 p. (Ph.D.Dissertation).
23. MOTE, S.H. & CHU, K. - H. Cable trusses subjected
to earthquakes. Journal of the Structural Divi-
sion, ASCE, 104 (ST4): 667-80, April, 1978.
24. NEWMARK, N.M. A method of computation for structural
dynamics. Journal of the Engineering Mechanics
Division, ASCE, 85 (EM3): 67-94, July, 1959.

25. PAPADRAKAKIS, M. Inelastic dynamic response of cable networks. Journal of Structural Engineering. ASCE, 109 (ST5): 1139-54, May, 1983.
26. SANTOS NETTO, P. Contribuição ao estudo das coberturas pênseis cilíndricas não protendidas. São Carlos, EESC-USP, 1975. 129 p. (Dissertação de Mestrado).
27. THOMSON, W.T. Teoria da vibração com aplicações. (Theory of vibration with applications). Trad. por Cássio Sigaud. Rio de Janeiro, Interciência, 1978. 462 p.
28. URELIUS, D.E. & FOWLER, D.W. Behaviour of prestressed cable truss structures. Journal of the Structural Division, ASCE, 100 (ST8): 1627-41, August, 1974.
29. WEST, H.H.; GESCHWINDNER, L.F.; SUHOSKI, J.E. Natural vibrations of suspension cables. Journal of the Structural Division, ASCE, 101 (ST11): 2277-91, Nov. 1975.

2. ANÁLISE ESTÁTICA DE CABOS-TRELIÇA

2.1 - MATRIZ DE RIGIDEZ DE UM ELEMENTO DO CABO-TRELIÇA

Como se trata de uma estrutura de comportamento não linear, a análise é feita por processo iterativo, buscando-se determinar os esforços e os deslocamentos correspondentes à posição final de equilíbrio.

Com esse intuito, é necessário que se consiga expressar os esforços na estrutura numa posição genérica, a partir da qual obtém-se a posição final de equilíbrio.

Assim, considere-se um elemento da estrutura, cujas coordenadas dos nós final e inicial são referidas a um sistema de eixos como mostra a figura 2.1.

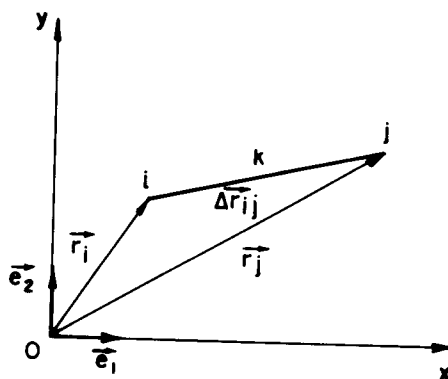


FIG. 2.1

Na figura 2.1, \vec{r}_i e \vec{r}_j são os vetores posição dos nós i e j , que conectam o elemento k , e \vec{e}_1 e \vec{e}_2 são os versores da direção do eixo x e do eixo y , respectivamente. Portanto:

$$\vec{r}_i = x_i \vec{e}_1 + y_i \vec{e}_2 \quad (2.1)$$

$$\vec{r}_j = x_j \vec{e}_1 + y_j \vec{e}_2 \quad (2.2)$$

donde:

$$\Delta\vec{r}_{ij} = \vec{r}_j - \vec{r}_i = (x_j - x_i)\vec{e}_1 + (y_j - y_i)\vec{e}_2 \quad (2.3)$$

O comprimento do elemento k , l_{ij} , é obtido pelo módulo do vetor $\Delta\vec{r}_{ij}$:

$$l_{ij} = (\Delta\vec{r}_{ij} \cdot \Delta\vec{r}_{ij})^{1/2} \quad (2.4)$$

ou ainda:

$$l_{ij} = [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2} \quad (2.5)$$

A figura 2.2 indica o elemento k , com o seu comprimento indeformado s_{0ij} , e sob uma força de tração \vec{T}_{ij} , quando assume o comprimento l_{ij} .

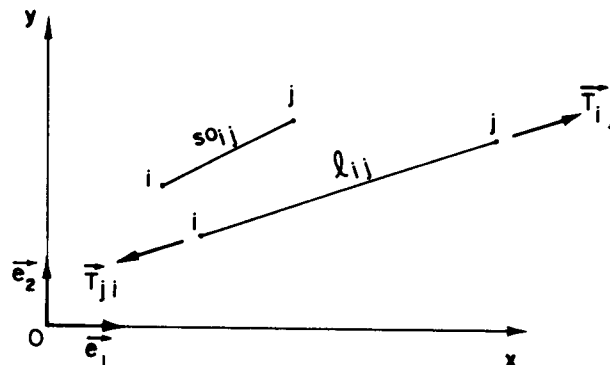


FIG. 2.2

O escalar T_{ij} é o módulo do vetor \vec{T}_{ij} , dado pela expressão:

$$\vec{T}_{ij} = T_{ij} \left(\frac{\Delta \vec{r}}{\ell} \right)_{ij} \quad (2.6)$$

Supondo-se que os nós coordenados sofram deslocamentos $d\vec{r}_i$ e $d\vec{r}_j$, a correspondente variação na força no elemento fica:

$$d\vec{T}_{ij} = dT_{ij} \left(\frac{\Delta \vec{r}}{\ell} \right)_{ij} + T_{ij} \left[\frac{d(\Delta \vec{r}) \cdot \ell - \Delta \vec{r} \cdot d\ell}{\ell^2} \right]_{ij} \quad (2.7)$$

Rearranjando a equação (2.7), obtêm-se:

$$d\vec{T}_{ij} = \left(\frac{\Delta \vec{r}}{\ell} \right)_{ij} \left(\frac{dT}{d\ell} - \frac{T}{\ell} \right)_{ij} d\ell_{ij} + \left(\frac{T}{\ell} \right)_{ij} d(\Delta \vec{r}_{ij}) \quad (2.8)$$

onde:

$$d(\Delta \vec{r}_{ij}) = \frac{\partial(\Delta \vec{r}_{ij})}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial(\Delta \vec{r}_{ij})}{\partial y_i} \Delta y_i + \frac{\partial(\Delta \vec{r}_{ij})}{\partial x_j} \Delta x_j + \frac{\partial(\Delta \vec{r}_{ij})}{\partial y_j} \Delta y_j \quad (2.9)$$

e:

$$d\ell_{ij} = \frac{\partial \ell_{ij}}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial \ell_{ij}}{\partial y_i} \Delta y_i + \frac{\partial \ell}{\partial x_j} \Delta x_j + \frac{\partial \ell}{\partial y_j} \Delta y_j \quad (2.10)$$

Substituindo as expressões de $d\ell_{ij}$, $\Delta \vec{r}_{ij}$ e suas derivadas parciais em (2.8), tem-se:

$$d\vec{T}_{ij} = \frac{(x_j - x_i)\vec{e}_1 + (y_j - y_i)\vec{e}_2}{l_{ij}} \left(\frac{dT}{d\ell} - \frac{T}{\ell} \right)_{ij} .$$

$$\cdot \left[-\frac{(x_j - x_i)}{l_{ij}} \Delta x_i + \frac{(y_j - y_i)}{l_{ij}} \Delta y_i + \frac{(x_j - x_i)}{l_{ij}} \Delta x_j + \frac{(y_j - y_i)}{l_{ij}} \Delta y_j \right] +$$

$$+ \frac{T}{\ell} \left[(-\vec{e}_1) \Delta x_i + (-\vec{e}_2) \Delta y_i + (\vec{e}_1) \Delta x_j + (\vec{e}_2) \Delta y_j \right] \quad (2.11)$$

Definindo os cossenos diretores por:

$$\lambda_1 = \frac{(x_j - x_i)}{l_{ij}} \quad (2.12)$$

$$\lambda_2 = \frac{(y_j - y_i)}{l_{ij}} \quad (2.13)$$

a equação (2.11) pode ser escrita da seguinte forma:

$$d\vec{T}_{ij} = (\lambda_1 \vec{e}_1 + \lambda_2 \vec{e}_2) \left(\frac{dT}{d\ell} - \frac{T}{\ell} \right)_{ij} .$$

$$\cdot (-\lambda_1 \Delta x_i - \lambda_2 \Delta y_i + \lambda_1 \Delta x_j + \lambda_2 \Delta y_j) +$$

$$+ \frac{T}{\ell} \left(-\Delta x_i \vec{e}_1 - \Delta y_i \vec{e}_2 + \Delta x_j \vec{e}_1 + \Delta y_j \vec{e}_2 \right) \quad (2.14)$$

Introduzindo o fator G, definido como:

$$G = \left(\frac{dT}{d\ell} - \frac{T}{\ell} \right)_{ij} \quad (2.15)$$

as componentes do vetor $d\vec{T}_{ij}$ são expressas por:

$$\begin{aligned}
 (dT_{ij})_x &= d\vec{T}_{ij} \cdot \vec{e}_1 = -[G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta x_i - \\
 &\quad - (G\lambda_1\lambda_2)\Delta y_i + [G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta x_j + \\
 &\quad + (G\lambda_1\lambda_2)\Delta y_j
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
 (dT_{ij})_y &= d\vec{T}_{ij} \cdot \vec{e}_2 = -(G\lambda_1\lambda_2)\Delta x_i - [G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta y_i + \\
 &\quad + (G\lambda_1\lambda_2)\Delta x_j + [G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta y_j
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Como $d\vec{T}_{ji} = -d\vec{T}_{ij}$, as componentes do vetor $d\vec{T}_{ji}$ podem ser escritas por:

$$\begin{aligned}
 (dT_{ji})_x &= d\vec{T}_{ji} \cdot \vec{e}_1 = [G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta x_i + \\
 &\quad + (G\lambda_1\lambda_2)\Delta y_i - [G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta x_j - \\
 &\quad - (G\lambda_1\lambda_2)\Delta y_j
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 (dT_{ji})_y &= d\vec{T}_{ji} \cdot \vec{e}_2 = (G\lambda_1\lambda_2)\Delta x_i + [G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta y_i - \\
 &\quad - (G\lambda_1\lambda_2)\Delta x_j - [G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij}] \Delta y_j
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

As equações (2.16), (2.17), (2.18) e (2.19) podem ser reunidas na forma matricial como segue:

$$\begin{Bmatrix} (dT_{ji})_x \\ (dT_{ji})_y \\ (dT_{ij})_x \\ (dT_{ij})_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & G\lambda_1\lambda_2 & -G\lambda_1^2 - \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & -G\lambda_1\lambda_2 \\ G\lambda_1\lambda_2 & G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & -G\lambda_1\lambda_2 & -G\lambda_2^2 - \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} \\ -G\lambda_1^2 - \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & -G\lambda_1\lambda_2 & G\lambda_1^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & G\lambda_1\lambda_2 \\ -G\lambda_1\lambda_2 & -G\lambda_2^2 - \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} & G\lambda_1\lambda_2 & G\lambda_2^2 + \left(\frac{T}{\ell}\right)_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta x_j \\ \Delta y_j \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Lembrando que admite-se a linearidade física, e que as deformações são pequenas, a variação no comprimento do cabo pela lei de Hooke é:

$$\Delta l_{ij} = l_{ij} - s_{o_{ij}} = \left(\frac{T}{EA} + \epsilon_{\theta}\right)_{ij} - s_{o_{ij}} \quad (2.21)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, A é a área da seção transversal do elemento (o produto EA admitido constante ao longo do comprimento do elemento), e ϵ_{θ} é a deformação específica devido à variação de temperatura $\Delta\theta$, cuja expressão é:

$$\epsilon_{\theta} = \Omega \Delta\theta = \Omega(\theta - \theta_o) \quad (2.22)$$

em que Ω é o coeficiente de dilatação térmica do material, e θ e θ_o são as temperaturas correspondentes ao estado atual e de referência respectivamente, consideradas constante ao longo do comprimento do elemento.

A deformação específica do elemento é definida pela relação:

$$\epsilon_{ij} = \left(\frac{l - s_o}{s_o}\right)_{ij} \quad (2.23)$$

sendo s_o o comprimento indeformado do elemento na temperatura de referência θ_o .

Logo, das equações (2.21) e (2.23) tem-se a força no elemento:

$$T_{ij} = [EA(\epsilon - \epsilon_{\theta})]_{ij} \quad (2.24)$$

Para os elementos sem rigidez a forças compressivas, a força no elemento é nula ($T = 0$) para $\epsilon \leq \epsilon_{\theta}$, pois nesse caso, o comprimento l resulta menor ou igual ao comprimento indeformado s_0 .

O fator G dado pela equação (2.15), também pode ser escrito na forma:

$$G = \frac{1}{s_{0ij}} \left(\frac{dT}{d\epsilon} \right)_{ij} - \left(\frac{T}{l} \right)_{ij} \quad (2.25)$$

Assim, introduzindo $\frac{dT}{d\epsilon}$, a diferencial da equação (2.24), na equação (2.25), o fator G fica:

$$G = \frac{EA}{s_0} - \frac{T}{l} \quad (2.26)$$

para elementos com rigidez à compressão.

Para elementos sem rigidez à compressão o fator G é obtido pela equação (2.26) desde que $\epsilon \geq \epsilon_{\theta}$; se $\epsilon \leq \epsilon_{\theta}$, G resulta nulo ($G = 0$).

Para um elemento do cabo-treliça submetido a carregamento uniformemente distribuído ao longo do seu comprimento, a referência (18) fornece a seguinte equação de 3º grau para o cálculo da força nos elementos:

$$\frac{T}{EA} - \frac{(1 + \epsilon - \epsilon_{\theta})}{24} \left(\frac{Q}{T} \right)^2 - (\epsilon - \epsilon_{\theta}) = 0 \quad (2.27)$$

onde Q é a resultante do carregamento distribuído.

A equação (2.27) pode ser escrita na forma adimensional:

$$\hat{T} - \hat{\epsilon} - \frac{1}{24} (c + \hat{\epsilon}) \left(\frac{\hat{Q}}{\hat{T}} \right)^2 = 0 \quad (2.28)$$

onde:

$$\hat{T} = c \frac{T}{EA} \quad (2.29)$$

$$\hat{\epsilon} = c(\epsilon - \epsilon_{\theta}) \quad (2.30)$$

$$\hat{Q} = c \frac{Q}{EA} \quad (2.31)$$

e c é um adimensional multiplicador, cujo valor conveniente para cabos de aço é 10^3 .

Introduzindo os parâmetros

$$M_1 = \frac{c + \hat{\epsilon}}{24} (\hat{Q})^2 \quad (2.32)$$

$$M_2 = \hat{\epsilon} \quad (2.33)$$

a equação (2.28) fica:

$$\hat{T} - \frac{M_1}{(\hat{T})^2} - M_2 = 0 \quad (2.34)$$

que pode ser resolvida pelo método iterativo de Newton-Raphson, fazendo:

$$\hat{T}_{(r+1)} = \hat{T}_{(r)} - \frac{\hat{T}_{(r)} - \frac{M_1}{(\hat{T}_{(r)})^2} - M_2}{1 + \frac{2M_1}{(\hat{T}_{(r)})^3}} \quad (2.35)$$

A partir de um valor inicial $\hat{T}_{(r=0)} > 0$ e a função $f(\hat{T}_{(r=0)}) \leq 0$, obtém-se de (2.35) o valor de \hat{T} , que substituído na relação (2.29) fornece a força no elemento (T).

Considerando as equações (2.25) e (2.27), o fator G para um elemento sob carregamento distribuído é:

$$G = \frac{EA}{s_o} \left[\frac{1 + \frac{1}{24} \frac{(\bar{Q})^2}{\bar{T}}}{1 + \frac{2M_1}{(\bar{T})^3}} \right] - \frac{\bar{T}}{\ell} \quad (2.36)$$

2.2 - MATRIZ DE RIGIDEZ DE UM ELEMENTO COM RESISTÊNCIA A FLEXÃO

Para elementos com rigidez à flexão, utiliza-se a matriz de rigidez usual, segundo o sistema de coordenadas local (figura 2.3), dada por:

$$[r]_k = \begin{bmatrix} EA/\ell & 0 & 0 & -EA/\ell & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/\ell^3 & 6EI/\ell^2 & 0 & -12EI/\ell^3 & 6EI/\ell^2 \\ 0 & 6EI/\ell^2 & 4EI/\ell & 0 & -6EI/\ell^2 & 2EI/\ell \\ -EA/\ell & 0 & 0 & EA/\ell & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/\ell^3 & -6EI/\ell^2 & 0 & 12EI/\ell^3 & -6EI/\ell^2 \\ 0 & 6EI/\ell^2 & 2EI/\ell & 0 & -6EI/\ell^2 & 4EI/\ell \end{bmatrix}_k \quad (2.37)$$

onde E , A , ℓ e I são respectivamente o módulo de elasticidade, a área da seção transversal, o comprimento e o momento de inércia do elemento k .

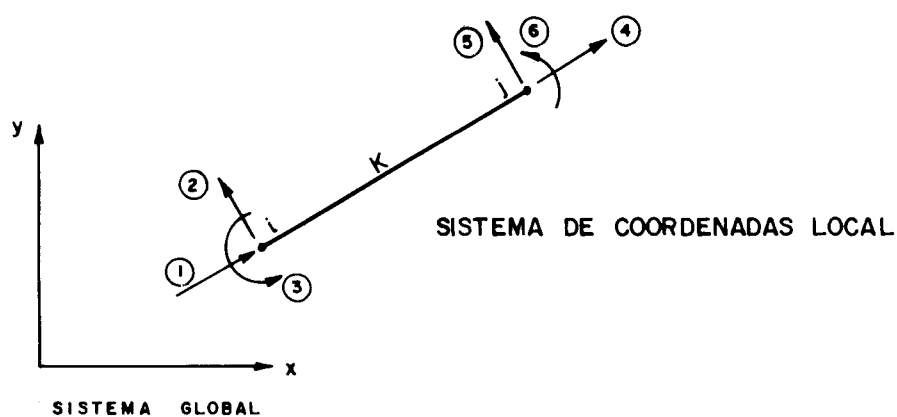


FIG. 2.3

Para se obter a matriz de rigidez segundo a mesma orientação de eixos do sistema global de coordenadas, deve-se transformá-la utilizando-se a matriz de rotação.

$$[t]_k = \begin{bmatrix} \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_k$$

onde λ_1 e λ_2 são os cossenos diretores do elemento k definidos pelas expressões (2.12) e (2.13).

A matriz de rigidez do elemento k no novo sistema de coordenadas é dada por:

$$[r']_k = [t]_k [r]_k [t]_k^t \quad (2.39)$$

2.3 - PROCEDIMENTO ITERATIVO

Os deslocamentos para o cabo-treliça são obtidos pelo processo da rigidez (ou dos deslocamentos), fazendo-se:

$$[K] \{d\} = \{F\} \quad (2.40)$$

onde $\{d\}$ é o vetor dos deslocamentos dos nós, $\{F\}$ é o vetor das ações aplicadas aos nós e $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura.

A matriz $[K]$ é obtida pela contribuição das matrizes de rigidez de todos os elementos que compõem a estrutura, e depende da posição final de equilíbrio, que é ainda desconhecida. Torna-se, então, necessário o emprego de um procedimento iterativo para a resolução do problema.

Inicialmente admite-se que uma posição de equilíbrio seja conhecida, e com essas coordenadas dos nós e esforços nos elementos calcula-se a matriz de rigidez da estrutura. O carregamento é aplicado e avalia-se o desequilíbrio de forças em todos os nós. A partir dessas ações determinam-se os deslocamentos através da equação (2.40) e daí as novas coordenadas dos nós.

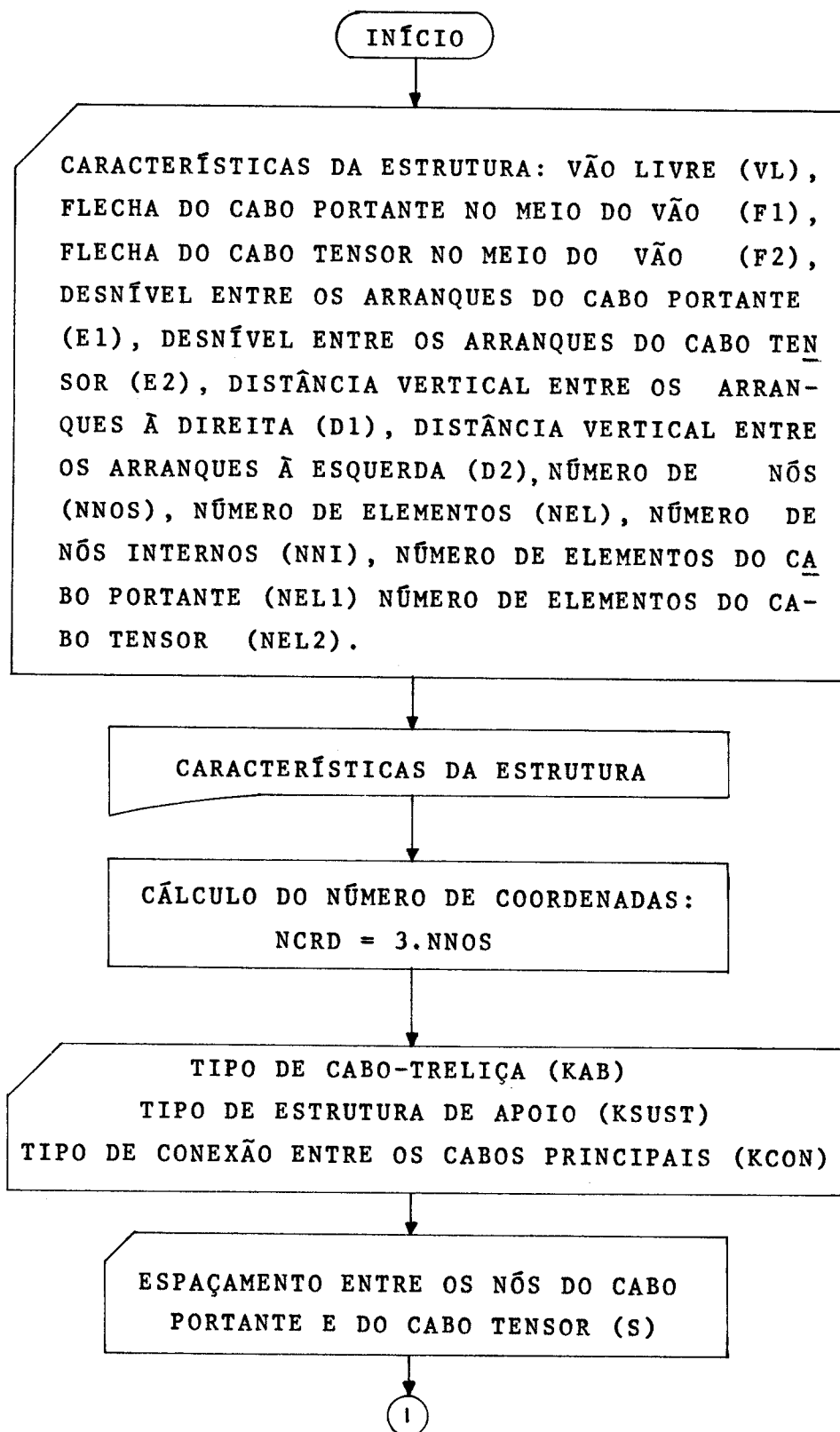
Em seguida, determinam-se os esforços nos elementos e uma nova matriz de rigidez é montada. Avalia-se o equilíbrio dos nós, e caso as forças desequilibradas estejam acima da tolerância admitida, resolve-se novamente o sistema (2.40), até que o equilíbrio dos nós seja satisfeito.

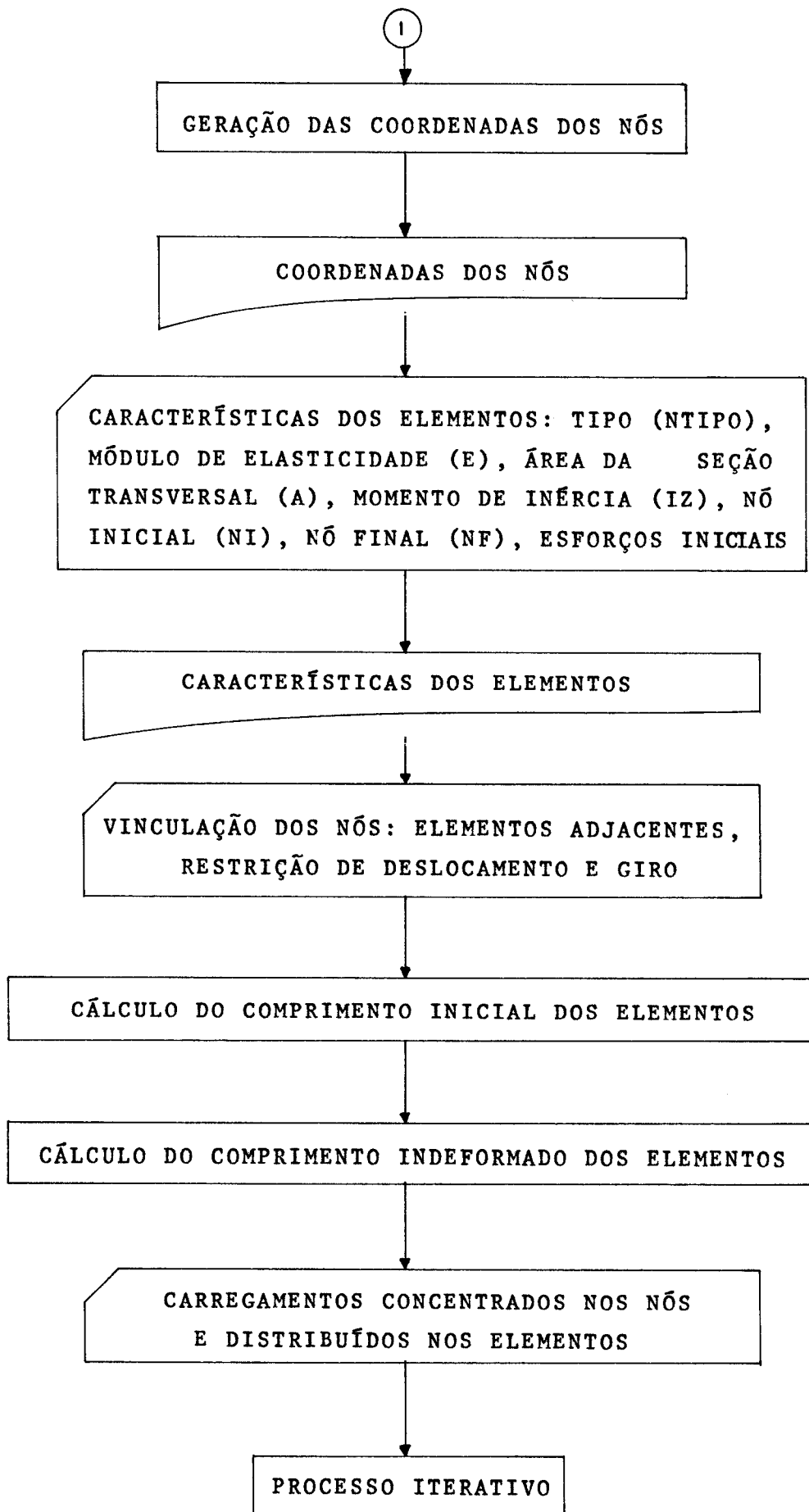
Para as estruturas e carregamentos usuais a convergência é bastante rápida. No entanto, para o caso de estruturas de alta flexibilidade torna-se necessário incrementar o carregamento gradativamente e obter a configuração de equilíbrio correspondente, até que toda a carga esteja atuando.

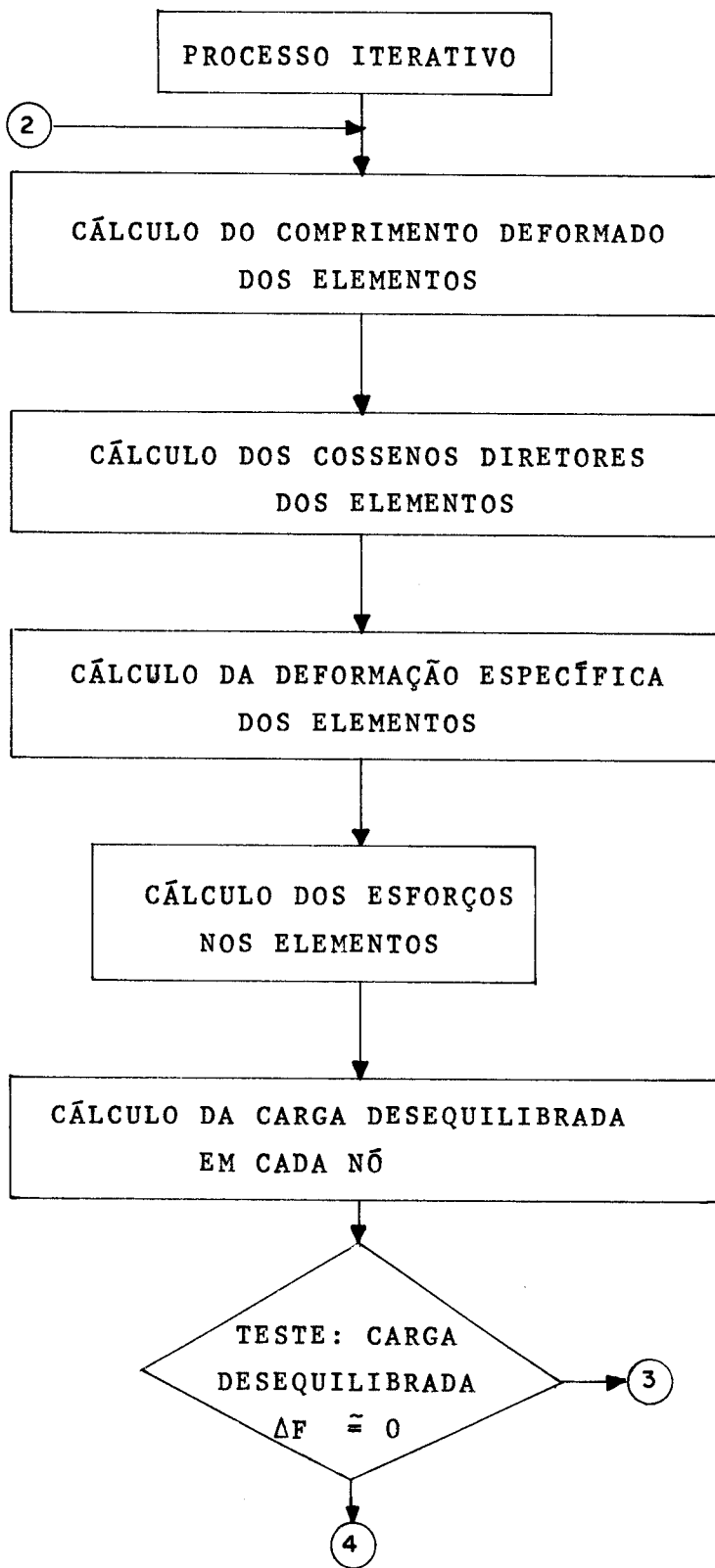
Se durante o processo iterativo o comprimento do elemento (l) resultar menor que o seu comprimento indeformado (s_0), e o elemento não tem resistência a esforços de compressão, este elemento não contribui na matriz de rigidez da estrutura nessa iteração.

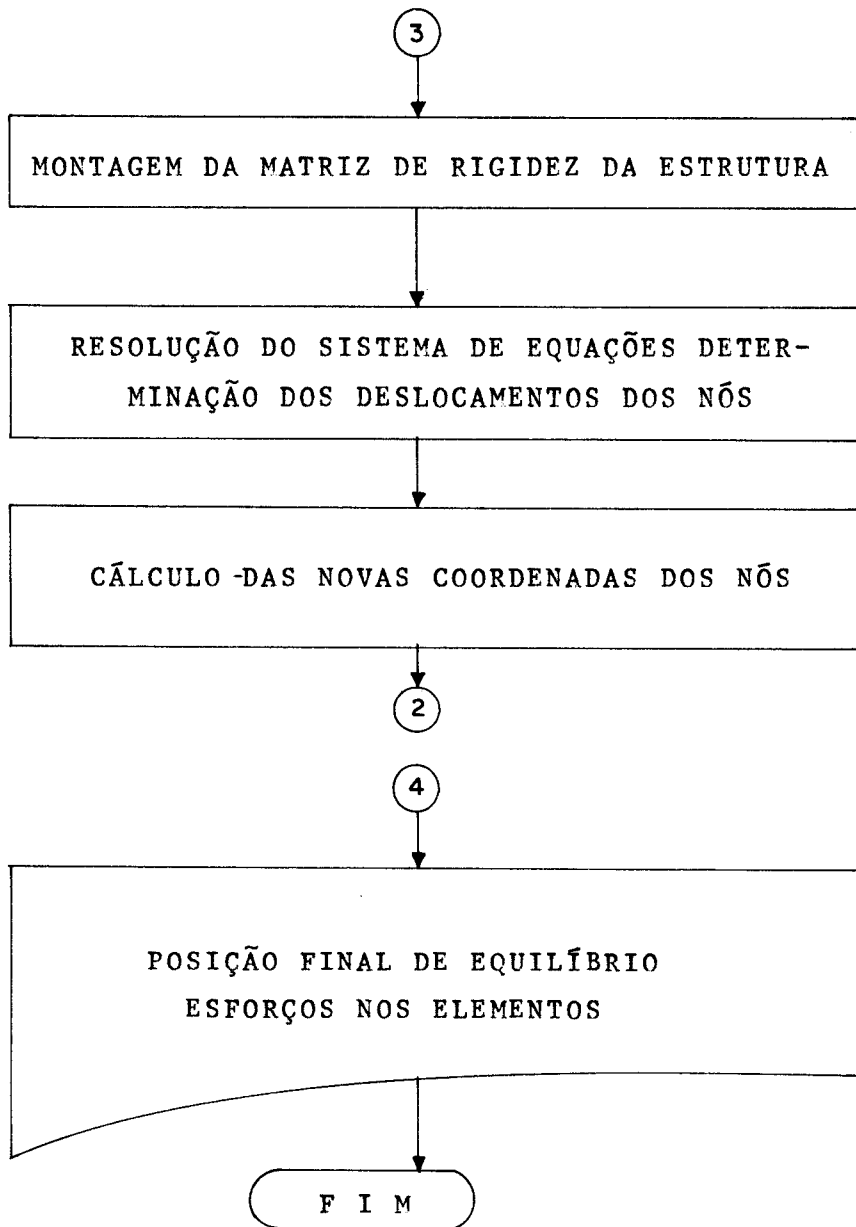
A seguir, apresenta-se o fluxograma que descreve o procedimento iterativo para a resolução do problema estático do cabo-treliça.

2.4 - FLUXOGRAMA









3. ANÁLISE DINÂMICA DE CABOS-TRELIÇA

3.1 - EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Para o cabo-treliça discretizado, a equação de movimento dos nós pode ser escrita na forma matricial como:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{F(x,t)\} \quad (3.1)$$

Nesta equação $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ é a matriz de amortecimento proporcional à matriz de massa, $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura, $\{F(x,t)\}$ é o vetor das ações aplicadas aos nós, $\{x\}$ é o vetor dos deslocamentos dos nós e $\{\dot{x}\}$ e $\{\ddot{x}\}$ são respectivamente os vetores das velocidades e das acelerações dos nós.

A matriz de massa da estrutura é obtida a partir da matriz de massa de cada nó.

Sendo ρ a densidade do material empregado, A a área da seção transversal e s_0 o comprimento indeformado do elemento k , a matriz de massa de cada nó é dada por:

$$[m]_i = \begin{bmatrix} M & & & \\ \sum_{k=1}^M (\rho A s_o / 2)_k & 0 & & 0 \\ & 0 & M & & \\ & & \sum_{k=1}^M (\rho A s_o / 2)_k & & 0 \\ & 0 & & 0 & \sum_{k=1}^M (\rho A s_o^3 / 24)_k \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A somat6ria se estende aos M elementos que concorrem ao n6 i.

Observa-se na matriz (3.2) que a massa de cada elemento 6 igualmente dividida e concentrada em seus n6s. A parcela da in6rcia 6 rota76o 6 dada pelo momento de in6rcia de massa em rela76o ao n6, admitindo-se para este c6lculo que metade do elemento pode girar sobre o n6 correspondente. No caso de cabos o termo de in6rcia ao giro torna-se nulo.

3.2 - PROCEDIMENTO ITERATIVO

A equa76o matricial (3.1) 6 resolvida iterativamente, podendo-se escrev6-la para as itera76es (r) e (r + 1) como segue:

$$[M] \{\ddot{x}\}_{(r)} + [C] \{\dot{x}\}_{(r)} + [K] \{x\}_{(r)} = \{F\}_{(r)} \quad (3.3)$$

$$[M] \{\ddot{x}\}_{(r+1)} + [C] \{\dot{x}\}_{(r+1)} + [K] \{x\}_{(r+1)} = \{F\}_{(r+1)} \quad (3.4)$$

Subtraindo-se (3.3) de (3.4), tem-se:

$$[M] \Delta \{\ddot{x}\}_{(r)} + [C] \Delta \{\dot{x}\}_{(r)} + [K] \Delta \{x\}_{(r)} = \Delta \{F\}_{(r)} \quad (3.5)$$

Considera-se para a integração numérica uma aceleração linear, ou seja, para qualquer tempo t , no intervalo de tempo Δt , tem-se:

$$\ddot{x}(t) = \dot{x}_{(r)} + \frac{\ddot{x}_{(r+1)} - \ddot{x}_{(r)}}{\Delta t} t \quad (3.6)$$

A velocidade é obtida integrando-se a equação (3.6) no intervalo de 0 a Δt , resultando:

$$\dot{x}_{(r+1)} = \dot{x}_{(r)} + (\ddot{x}_{(r+1)} + \ddot{x}_{(r)}) \frac{\Delta t}{2} \quad (3.7)$$

O deslocamento relativo é dado pela integração da equação de velocidade (3.7), obtendo-se:

$$x_{(r+1)} = x_{(r)} + \dot{x}_{(r)} \Delta t + \ddot{x}_{(r)} \frac{(\Delta t)^2}{3} + \ddot{x}_{(r+1)} \frac{(\Delta t)^2}{6} \quad (3.8)$$

As equações (3.7) e (3.8) podem ser escritas na forma:

$$\Delta \dot{x}_{(r)} = \dot{x}_{(r)} \Delta t + \Delta \ddot{x}_{(r)} \frac{\Delta t}{2} \quad (3.9)$$

$$\Delta x_{(r)} = \dot{x}_{(r)} \Delta t + \ddot{x}_{(r)} \frac{(\Delta t)^2}{2} + \Delta \ddot{x}_{(r)} \frac{(\Delta t)^2}{6} \quad (3.10)$$

onde Δx indica a variação do deslocamento, $\Delta \dot{x}$ a variação da velocidade e $\Delta \ddot{x}$ a variação da aceleração no intervalo de tempo Δt .

Introduzindo as expressões da variação de velocidade e de deslocamento, dadas em (3.9) e (3.10) na equação (3.5), obtêm-se considerando-se todos os nós da estrutura:

$$\begin{aligned}
 & [[M] + [C] \frac{\Delta t}{2} + [K] \frac{(\Delta t)^2}{6}] \Delta \{\dot{x}\}_{(r)} = \\
 & = \Delta\{F\}_{(r)} - [C] \{\dot{x}\}_{(r)} \Delta t - [K] [\{\dot{x}\}_{(r)} \Delta t + \{\ddot{x}\}_{(r)} \frac{(\Delta t)^2}{2}]
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

A equação (3.11) pode ser escrita compactamente

$$[\bar{M}] \Delta\{\dot{x}\}_{(r)} = \Delta\{\bar{F}\} \tag{3.12}$$

onde $[\bar{M}]$ é a matriz de massa modificada, e $\Delta\{\bar{F}\}$ é a matriz das ações modificada.

Da equação (3.12) obtém-se a variação da aceleração $\Delta\{\ddot{x}\}_{(r)}$, e daí a aceleração na iteração $(r + 1)$ pode ser calculada por:

$$\{\ddot{x}\}_{(r+1)} = \{\ddot{x}\}_{(r)} + \Delta\{\ddot{x}\}_{(r)} \tag{3.13}$$

As variações de velocidade $\Delta\{\dot{x}\}_{(r)}$ e de deslocamento $\Delta\{x\}_{(r)}$ são obtidas, então, das equações (3.9) e (3.10). Em seguida, calculam-se a velocidade e deslocamento, como segue:

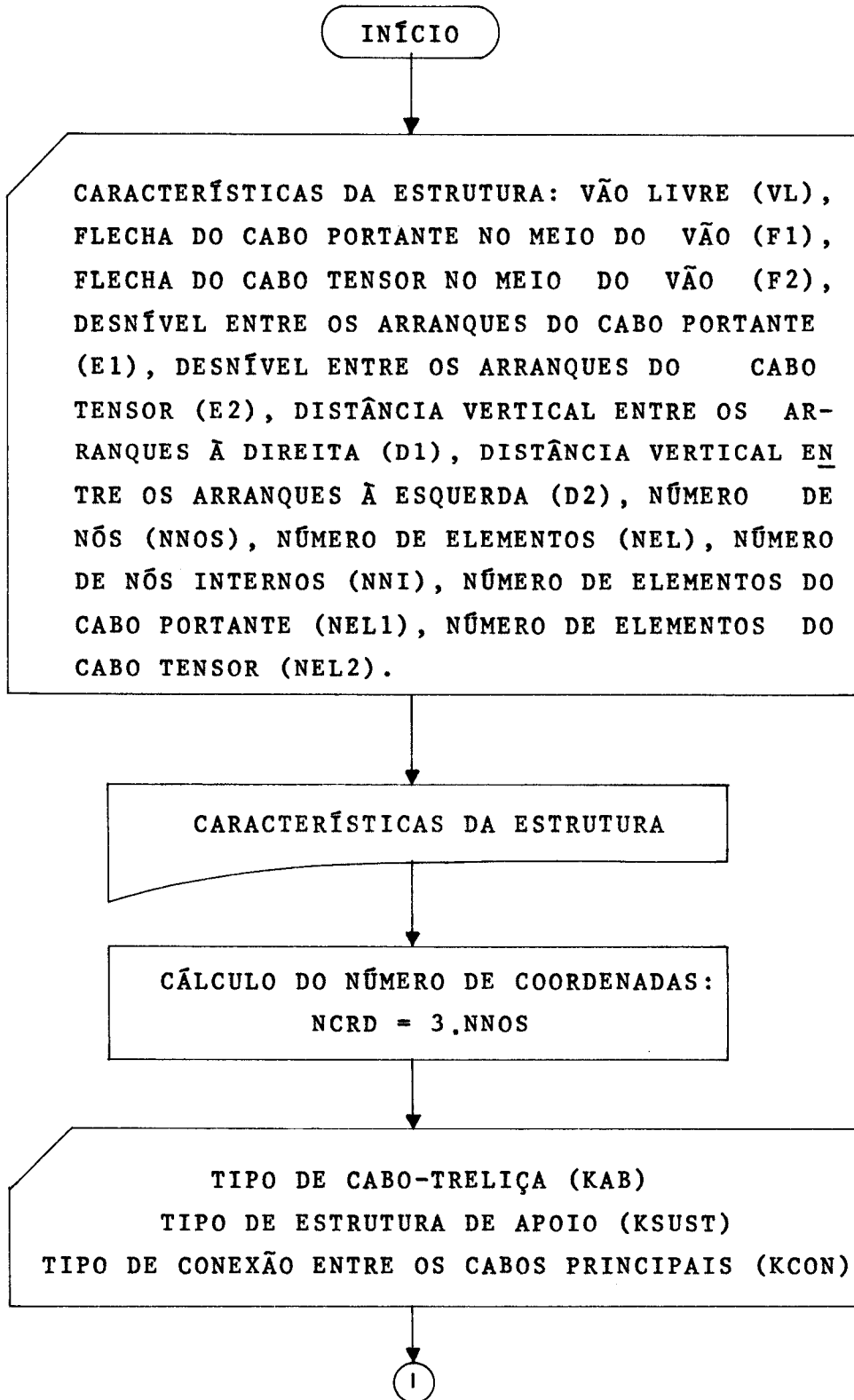
$$\{\dot{x}\}_{(r+1)} = \{\dot{x}\}_{(r)} + \Delta\{\dot{x}\}_{(r)} \tag{3.14}$$

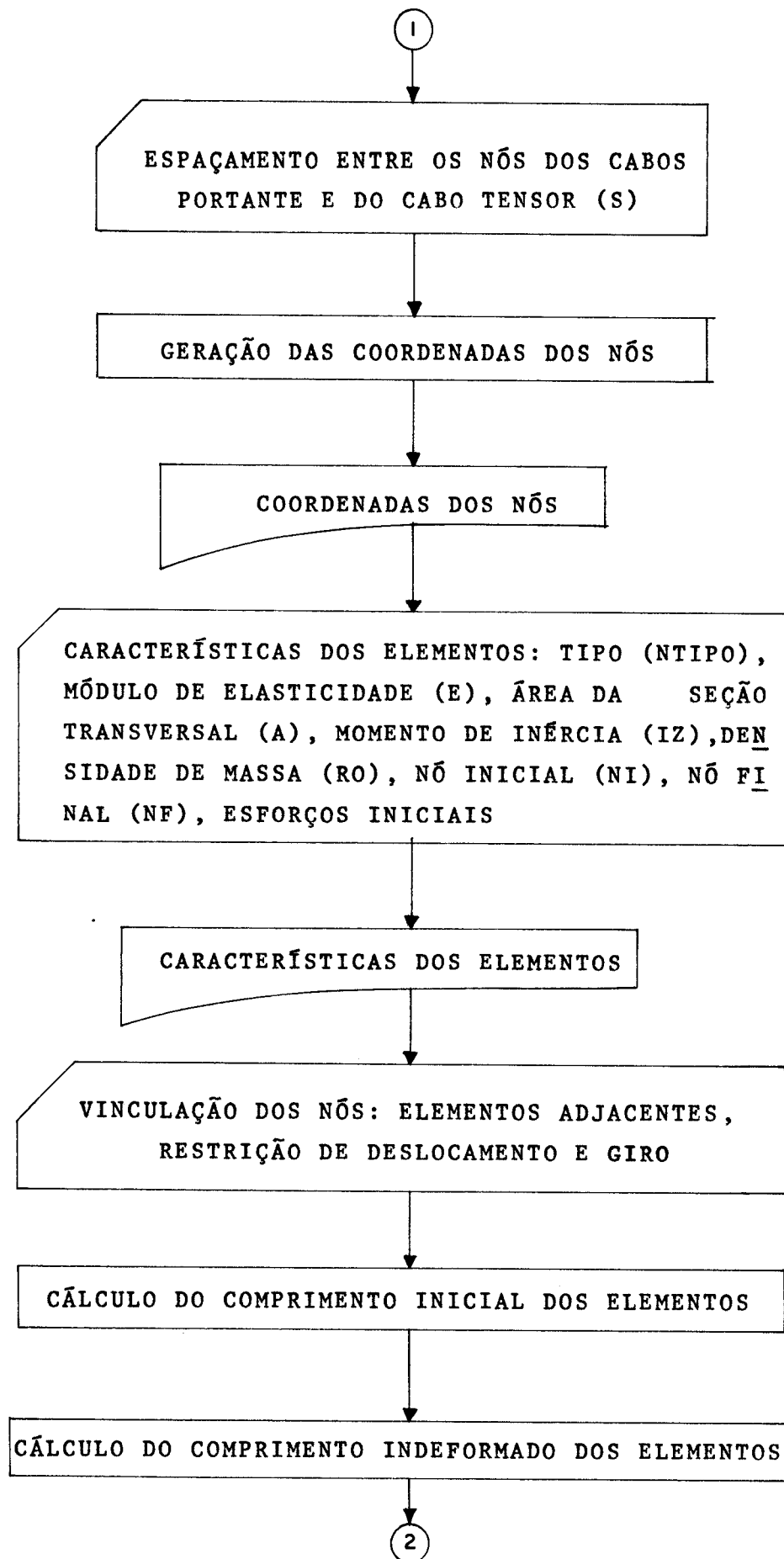
$$\{x\}_{(r+1)} = \{x\}_{(r)} + \Delta\{x\}_{(r)} \tag{3.15}$$

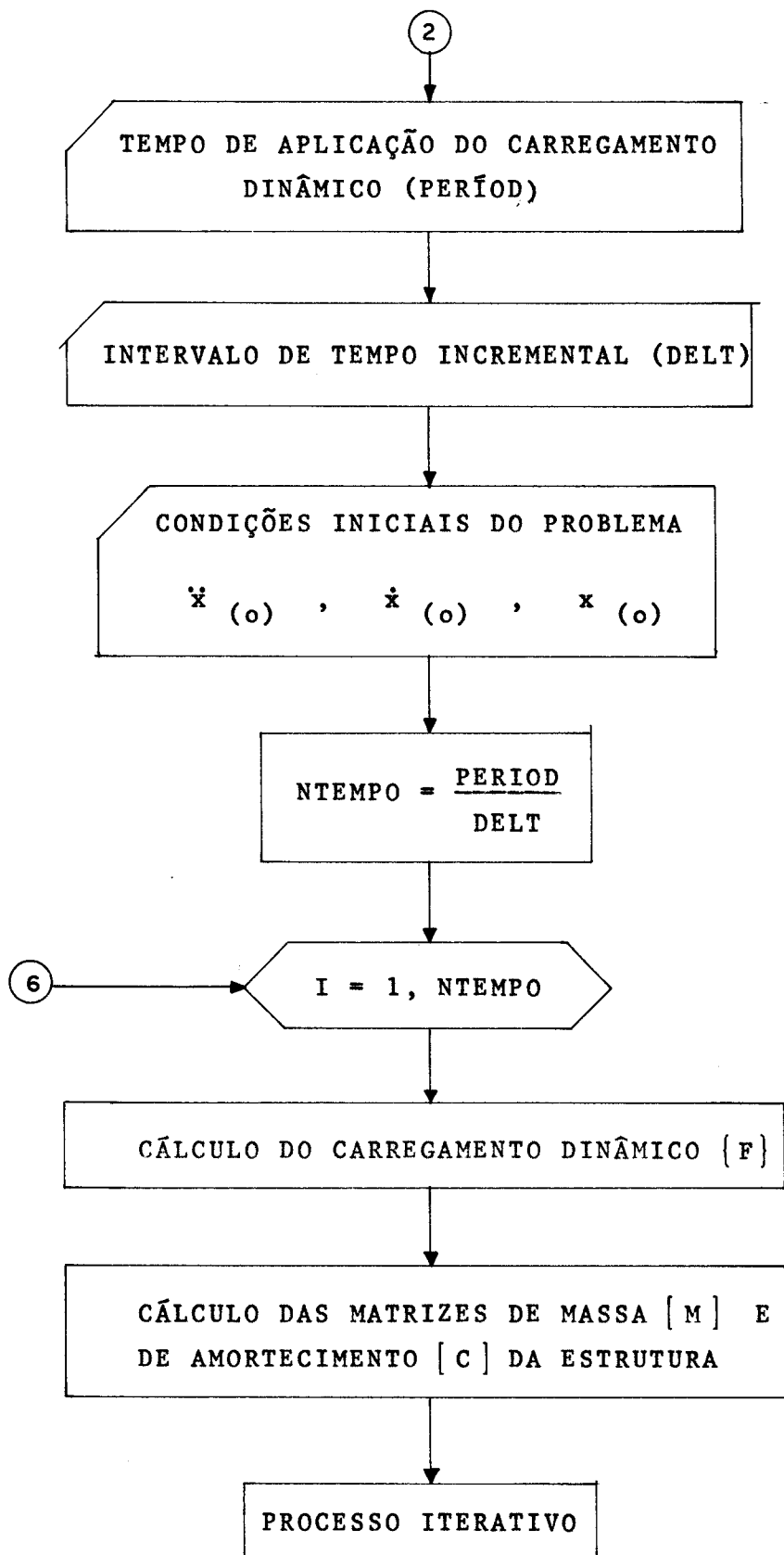
A matriz de rigidez $[K]$ e o vetor das ações $\{F\}$ são alterados a cada iteração dentro do intervalo de tempo Δt .

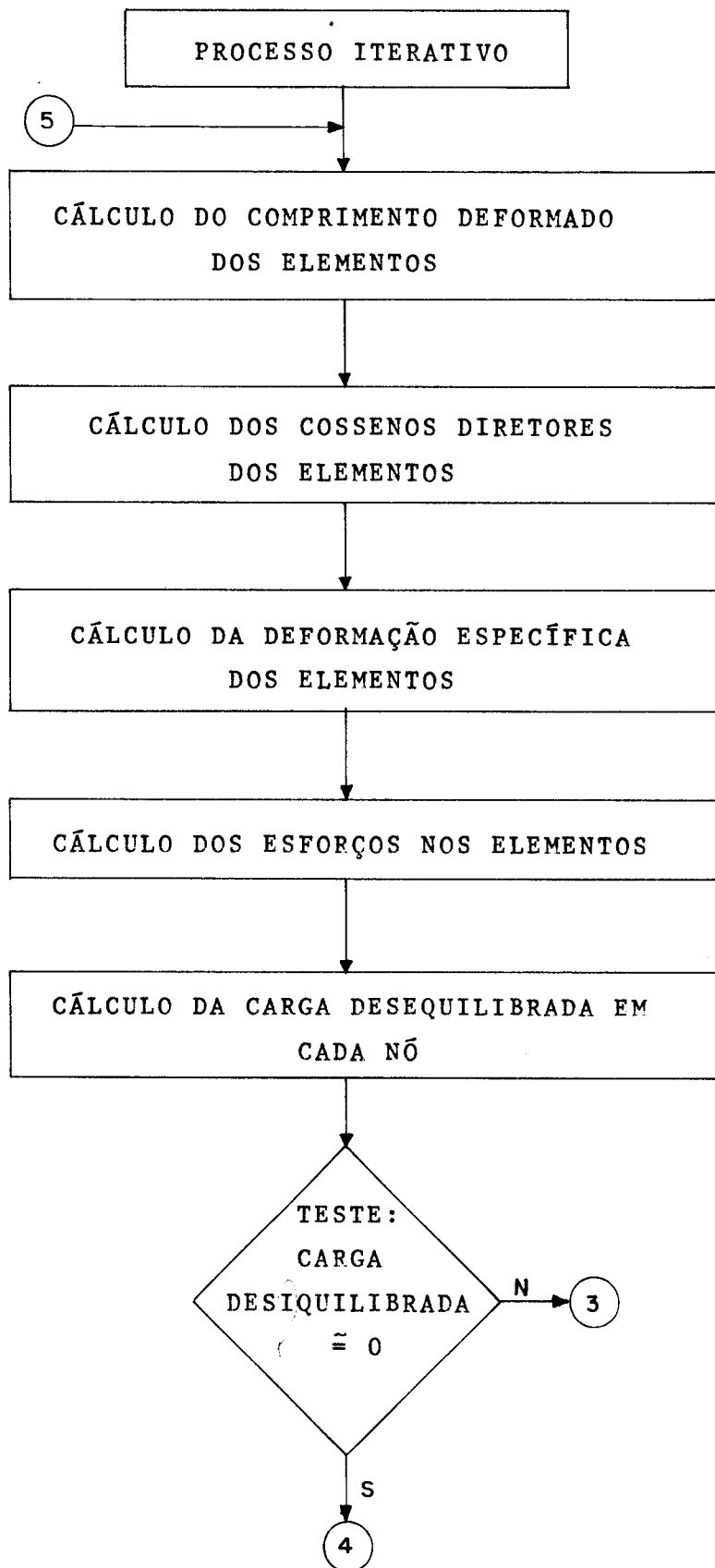
Apresenta-se no próximo item o fluxograma que ilustra o processo iterativo acima descrito.

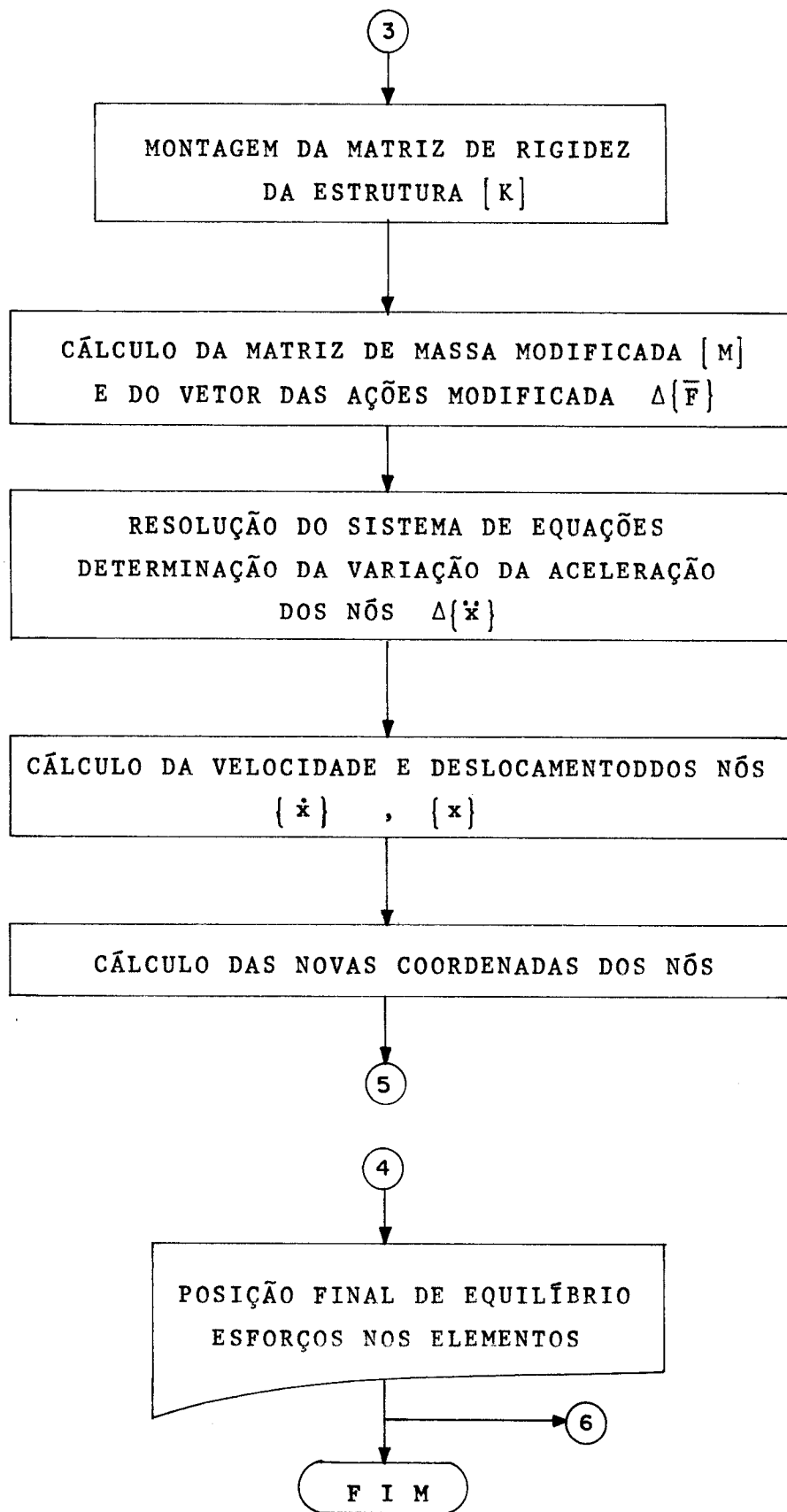
3.3 - FLUXOGRAMA











4. EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentadas as simulações numéricas, com a finalidade de analisar o comportamento do cabo-treliça em função da variação dos diversos parâmetros. As observações e comentários acerca dos resultados obtidos encontram-se no capítulo seguinte.

4.1 - CABOS-TRELIÇA COM CARREGAMENTOS ESTÁTICOS

4.1.1 - Cabos-Treliça com Hastes Verticais

São feitos dois tipos de experimentação, considerando sempre cabos-treliça com 60,0m de vão, área do cabo portante igual a $5,73\text{cm}^2$, área do cabo tensor igual a $3,98\text{cm}^2$ e área das hastes verticais igual a $0,94\text{cm}^2$. O módulo de elasticidade dos cabos principais é de 1600tf/cm^2 e de 1260tf/cm^2 para as hastes de ligação.

No primeiro tipo de experimentação procura-se determinar a influência da força de protensão (p), do espaçamento (S) das hastes de ligação, da distância entre os cabos principais (D), e das flechas dos cabos portante e tensor ($F1$ e $F2$), nos deslocamentos máximos e nas trações máximas do cabo-treliça.

As análises são feitas com a força de protensão variando de 0,2 a 0,6tf/m, o espaçamento das hastes de 2,0 a 6,0m, a distância entre os cabos de 0 a 2,0m, e admitin-

do-se as flechas dos cabos portante e tensor variando de 3,0 a 6,0m. Considera-se um carregamento uniformemente distribuído (q) igual a 0,8tf/m.

No segundo tipo de experimentação procura-se determinar a influência do tipo de carregamento e da relação flecha-vão nos deslocamentos do cabo. São considerados quatro diferentes carregamentos e três relações flecha-vão.

4.1.1.1 - Experimentação do primeiro tipo

Considere-se o cabo-treliça como o esquematizado na figura abaixo:

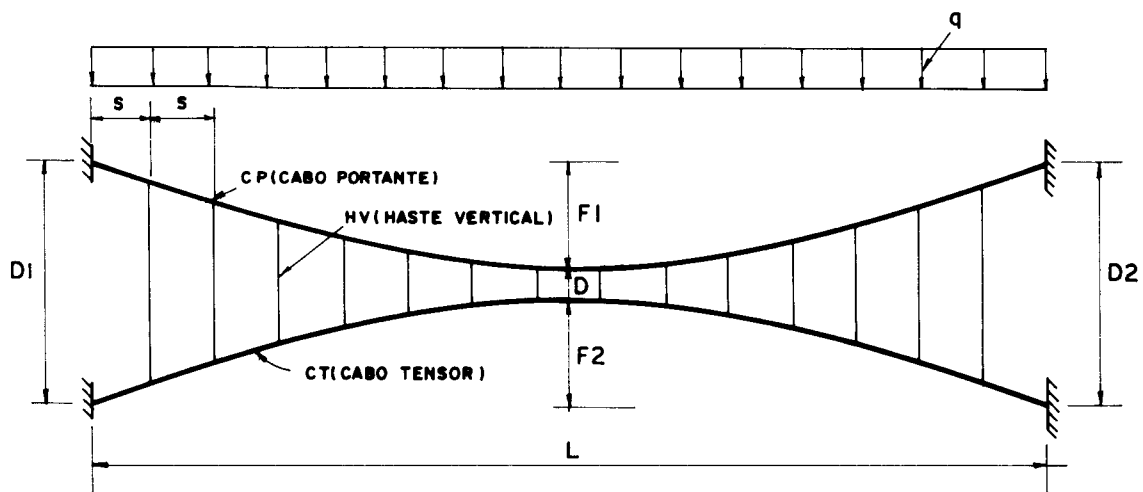


FIG. 4.1

I) Variação da força da protensão (p)

Admitindo-se $S = 2,0m$, $D = 1,0m$, $F1 = 3,0m$, $F2 = 3,0m$, e fazendo-se a força de protensão variar de 0,2tf/m a 0,6tf/m, obtêm-se para os deslocamentos e trações máximas os resultados dos gráficos nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

Os índices p e q indicam a força de protensão e o carregamento distribuído, respectivamente.

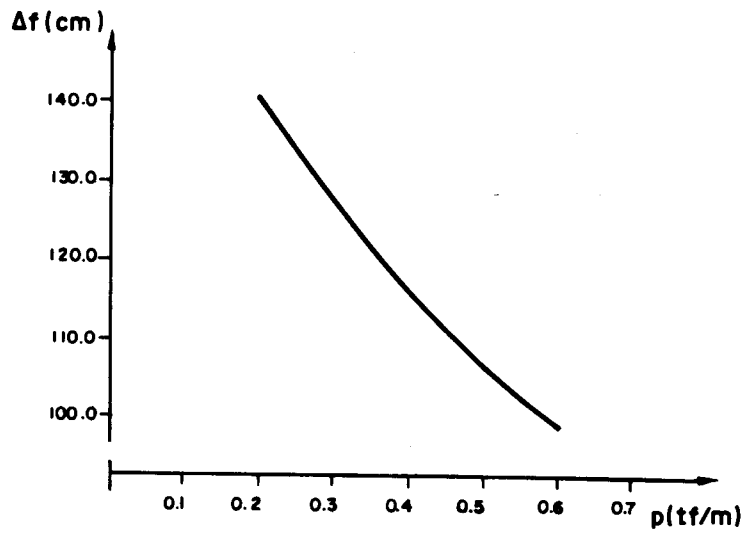


FIG. 4.2

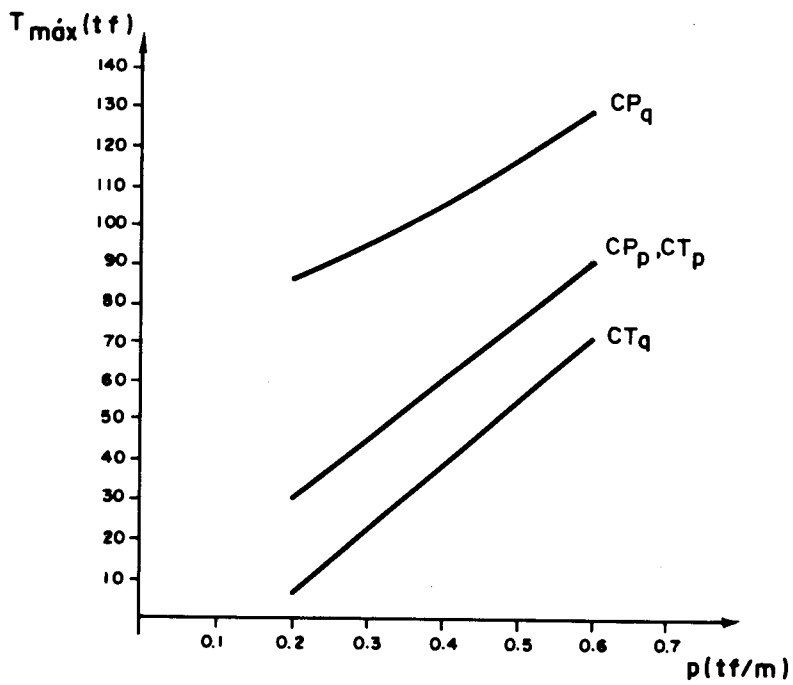


FIG. 4.3

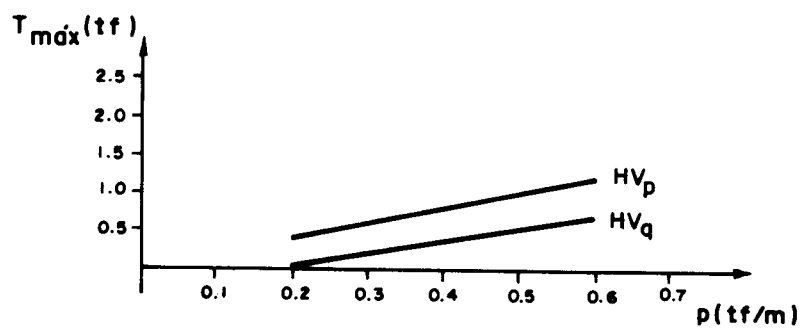


FIG. 4.4

II) Variação do espaçamento das hastes verticais (S)

Admitindo-se $D = 1,0\text{m}$, $F1 = 3,0\text{m}$, $F2 = 3,0\text{m}$ e força de protensão aplicada $p = 0,5\text{tf/m}$, em função da variação do espaçamento (S) das hastes são obtidos os deslocamentos e trações máximas como mostram as figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

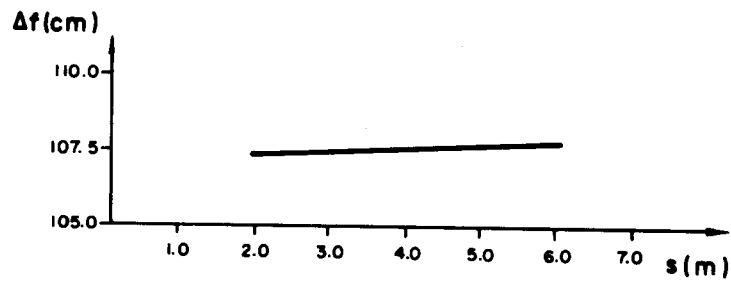


FIG. 4.5

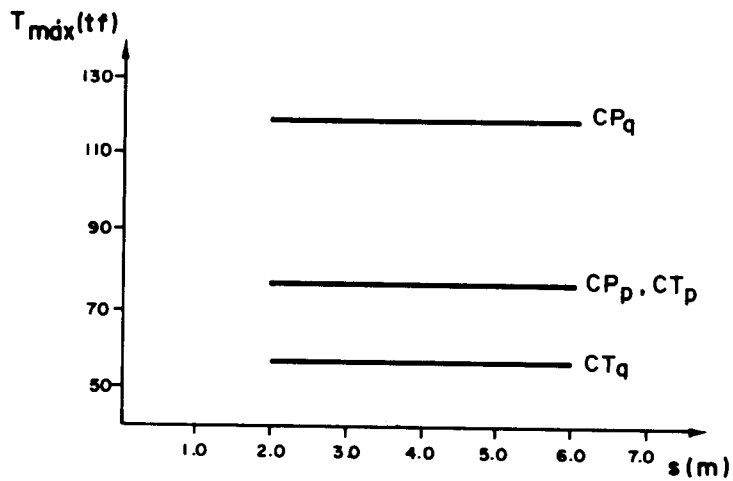


FIG. 4.6

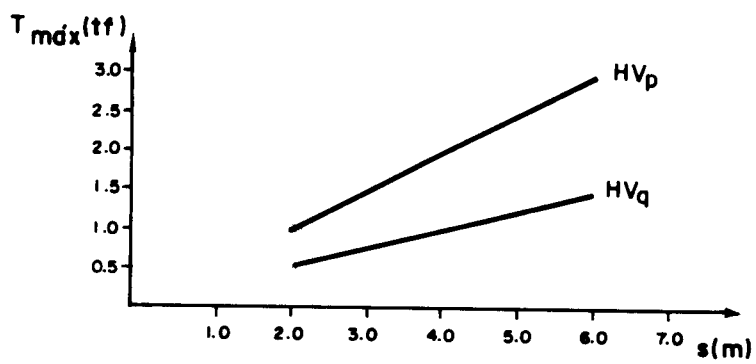


FIG. 4.7

III) Variação da distância mínima entre os cabos principais (D)

Para esta análise conservam-se as flechas dos cabos portante e tensor $F_1 = F_2 = 3,0\text{m}$ e adota-se o espaçamento entre as hastes de ligação $S = 2,0\text{m}$. A força de protensão aplicada é $p = 0,5\text{tf/m}$ e os deslocamentos e as forças de tração máximas são obtidas em função da variação da menor distância de ligação (D) entre os cabos portante e tensor (figuras 4.8, 4.9 e 4.10).

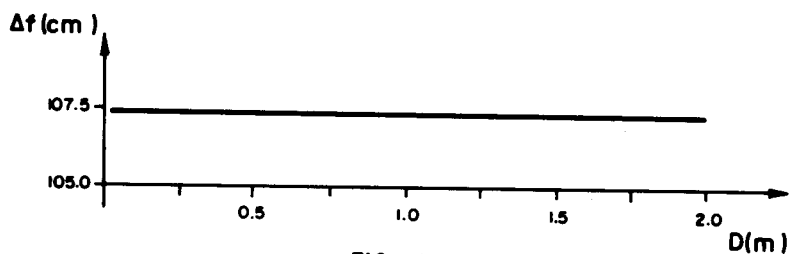


FIG. 4.8

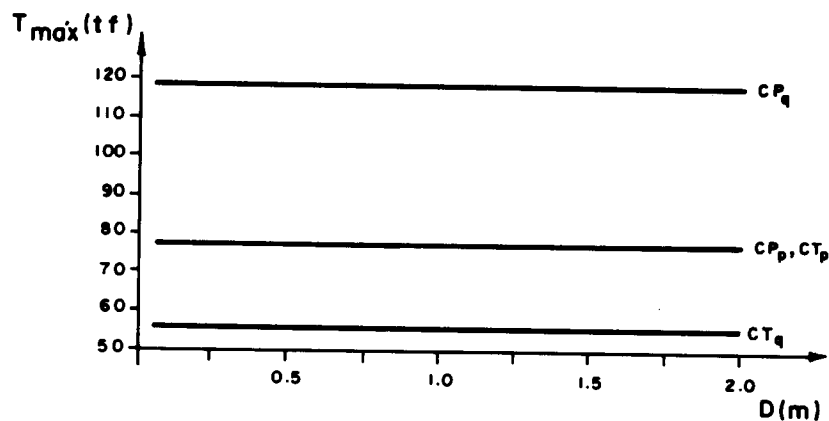


FIG. 4.9

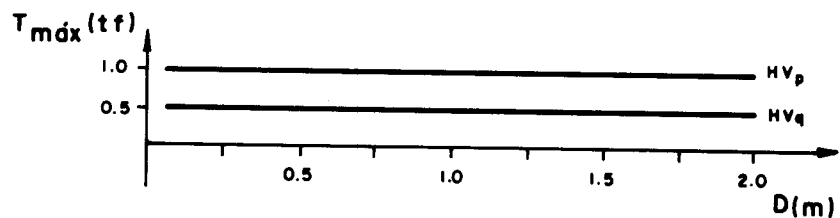


FIG. 4.10

IV) *Variação das flechas do cabo portante (F1) e do cabo tensor (F2)*

Conservando-se a força de protensão $p = 0,5tf/m$, o espaçamento $S = 2,0m$ e adotando-se $D = 1,0m$, faz-se a análise do cabo-treliça variando-se as flechas dos cabos portante e tensor (F1 e F2). Resultados de deslocamentos no meio do vão e trações máximas nos cabos principais e hastes de ligação encontram-se nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

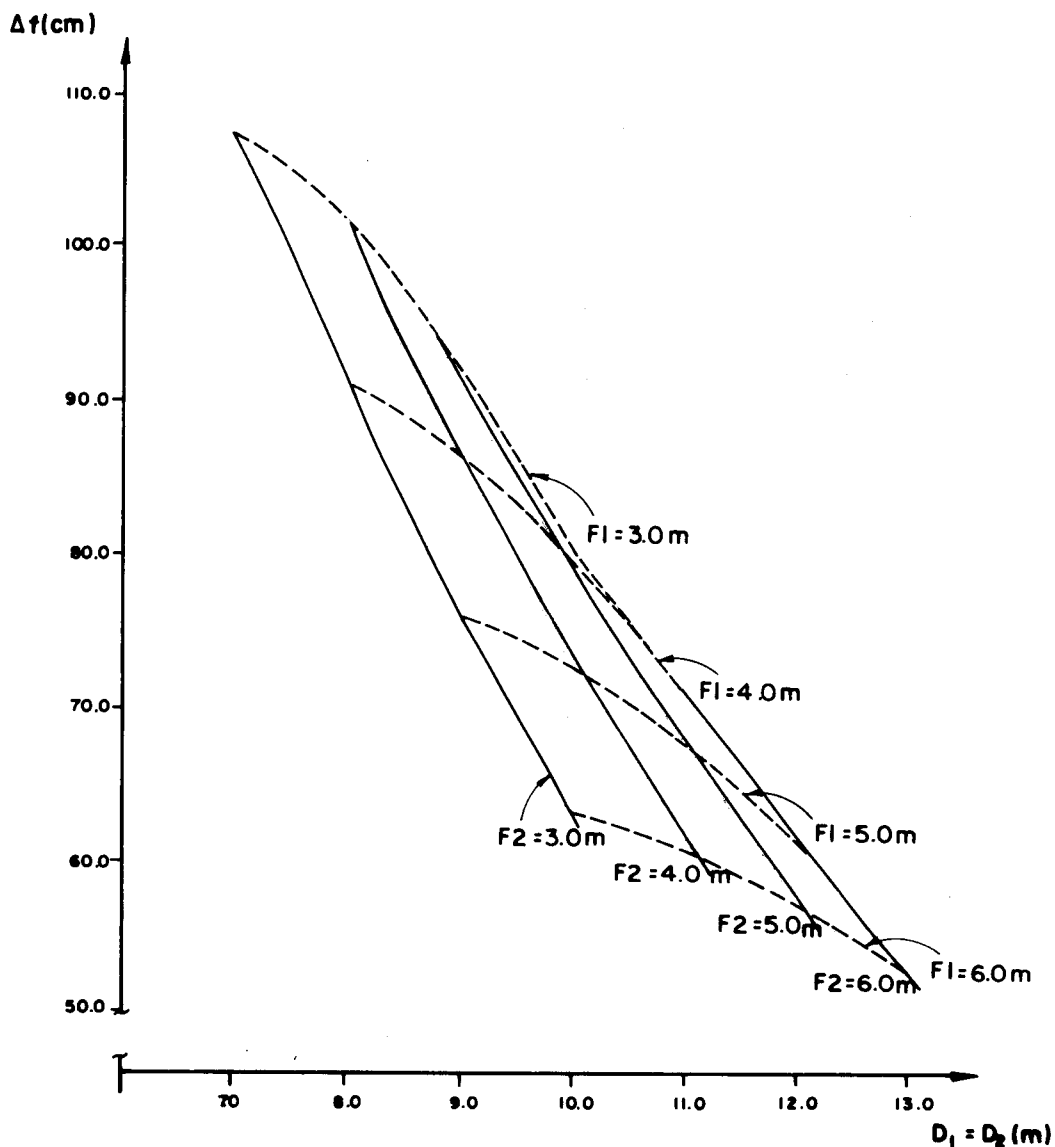


FIG. 4.11

4.1.1.2 - Experimentações do segundo tipo

Fundamentalmente, considera-se para esta análise um cabo-treliça, como o esquematizado na figura 4.14, submetido aos carregamentos indicados nesta figura, onde $q = 0,8tf/m$.

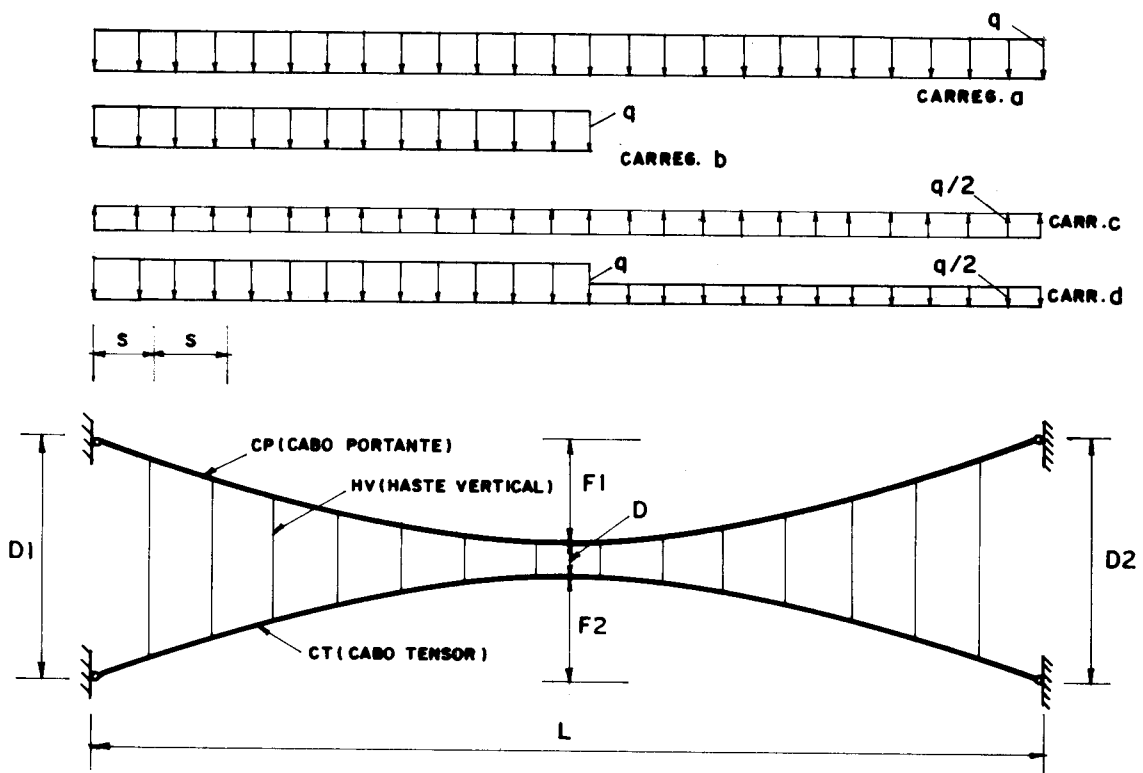


FIG. 4.14

III) Cabo-treliça com relações flecha-vão:

$$F1/L = 1/10 \text{ e } F2/L = 1/20$$

A figura 4.17 apresenta os deslocamentos produzidos pelos carregamentos a, b, c, d no cabo-treliça com flecha do cabo portante $F1 = 6,0\text{m}$ e flecha do cabo tensor $F2 = 3,0\text{m}$. Admitem-se $S = 2,0\text{m}$, $D = 1,0\text{m}$ e $p = 0,5\text{tf/m}$.

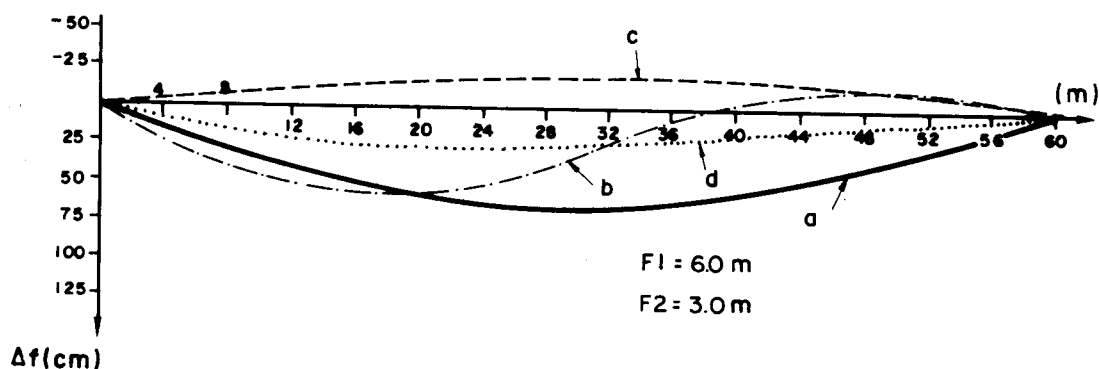


FIG. 4.17

4.1.2 - Cabos-treliça com Hastes Diagonais

São feitos dois tipos de experimentação, considerando como constantes a área do cabo portante, do cabo tensor e das hastes iguais a $14,55\text{cm}^2$, $9,07\text{cm}^2$ e $1,45\text{cm}^2$, respectivamente. Assume-se o módulo de elasticidade de todos os cabos igual a 1.260tf/cm^2 .

4.1.2.1 - Experimentações do primeiro tipo

As experimentações são feitas considerando-se carregamentos distribuídos de $0,120\text{tf/m}$ (carregamento a) e de $0,240\text{tf/m}$ (carregamento b), como indica a figura 4.18.

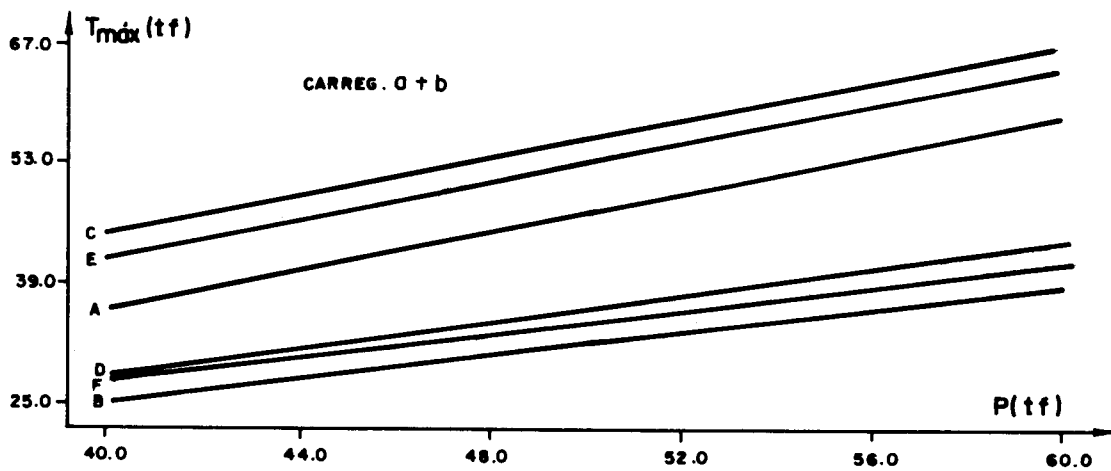
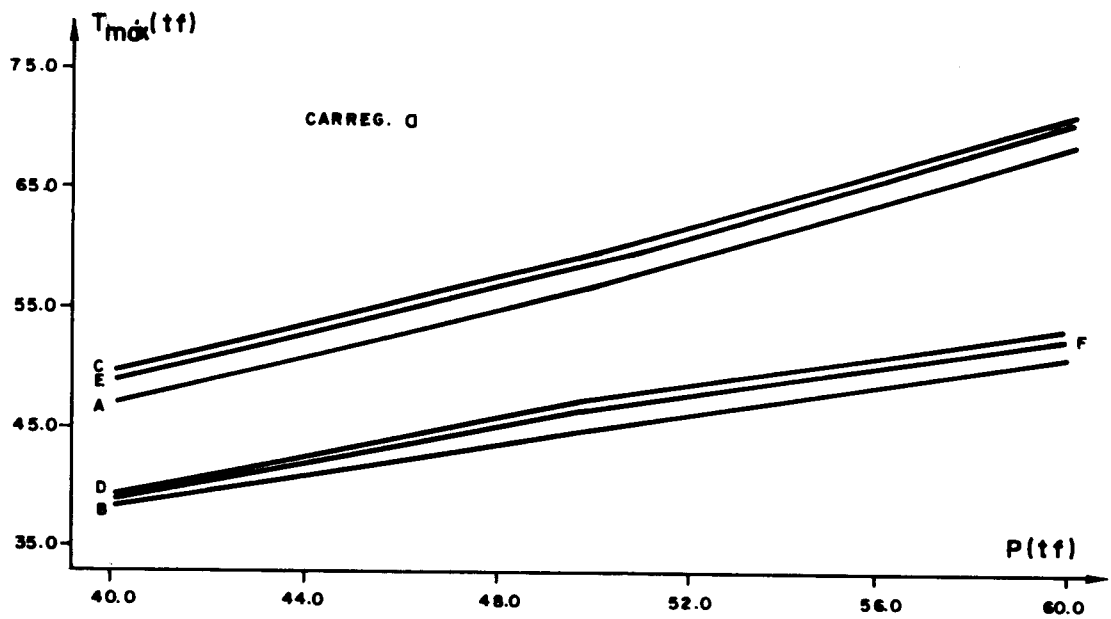
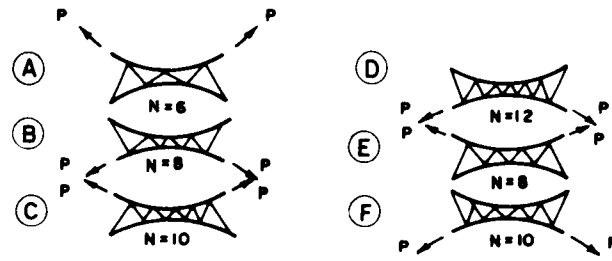


FIG. 4.19 - T_{\max} no cabo portante

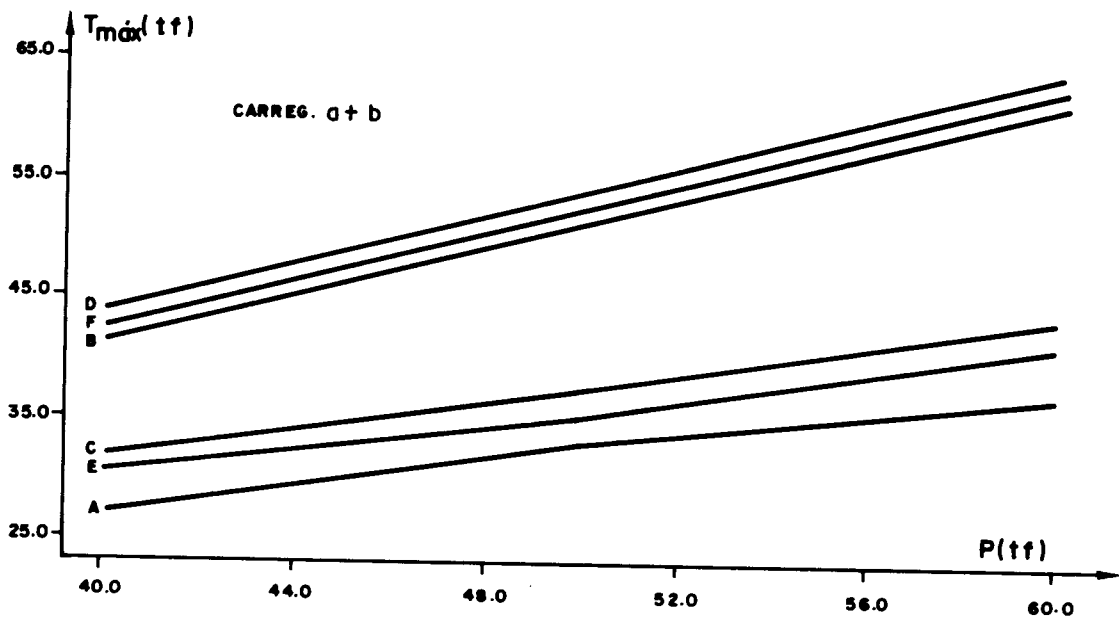
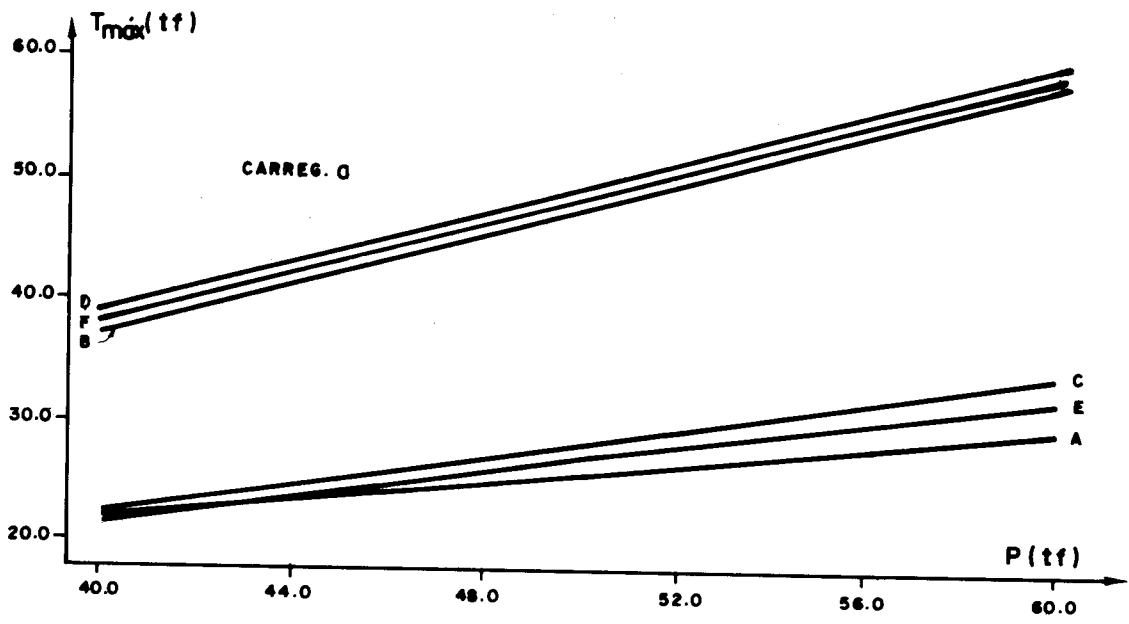


FIG.4.20 - T_{\max} no cabo tensor

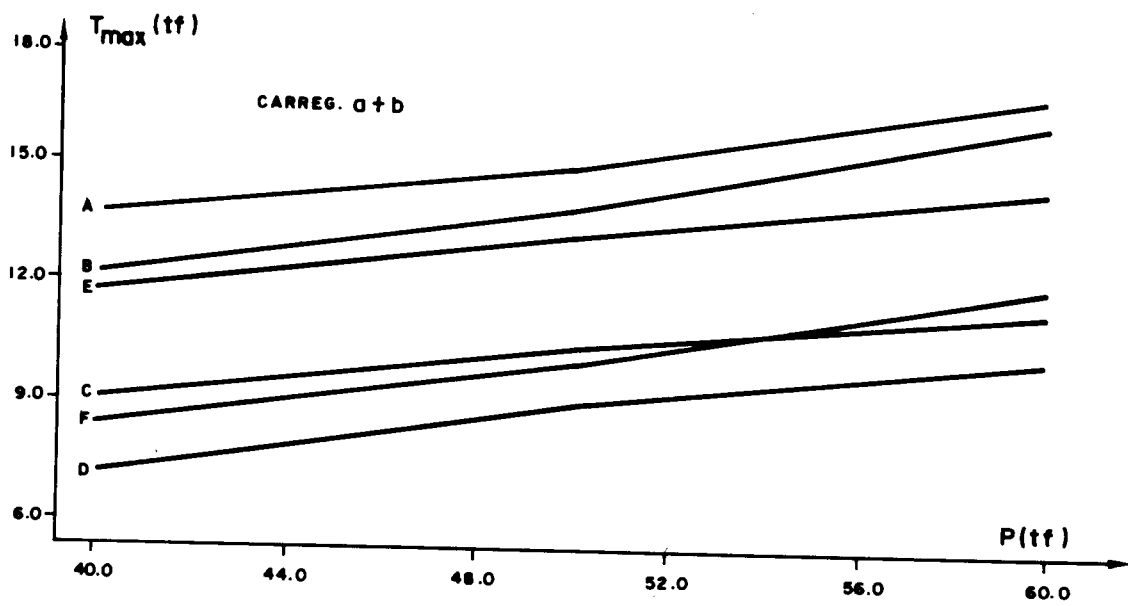
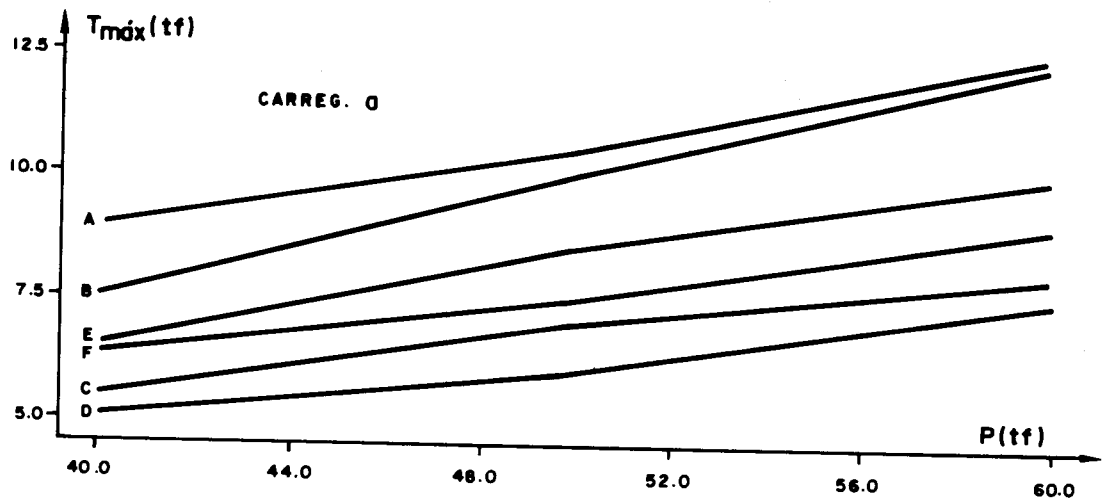


FIG. 4.21 - T_{\max} nas hastes diagonais

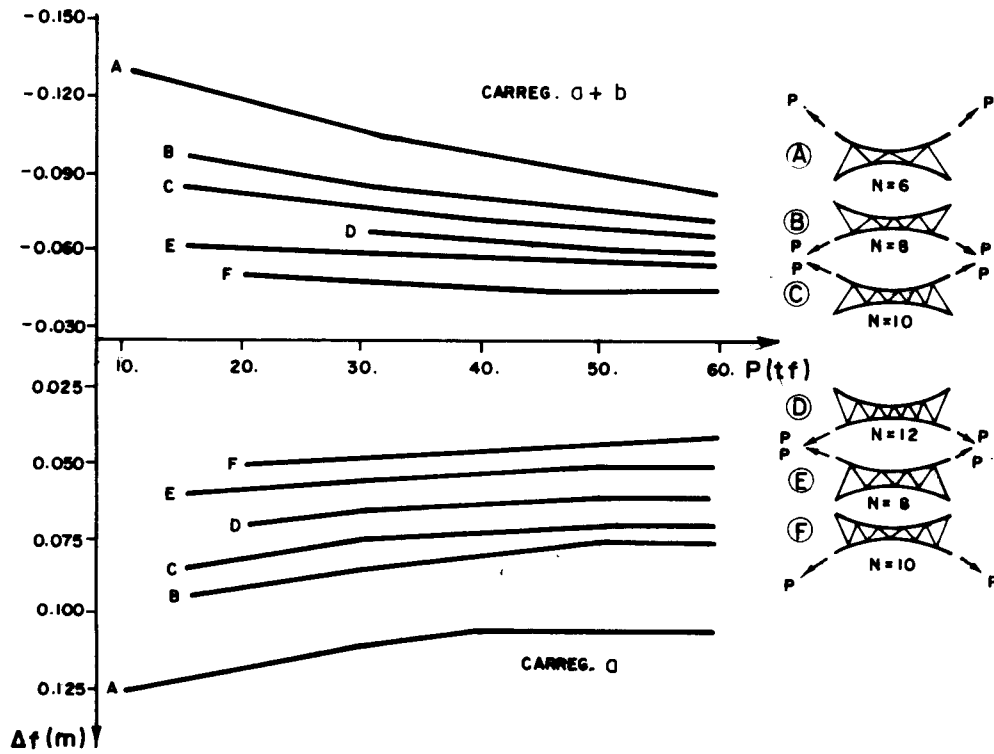


FIG. 4.22

As figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 referem-se aos valores de deslocamentos e trações máximas para cabos-treliça com $L = 80,0\text{m}$. Consideram-se estruturas com número de diagonais $N = 10$, $N = 12$, $N = 14$ e $N = 16$, e são fixados os parâmetros: $D = 1,0\text{m}$ e $F1 = F2 = 5,5\text{m}$

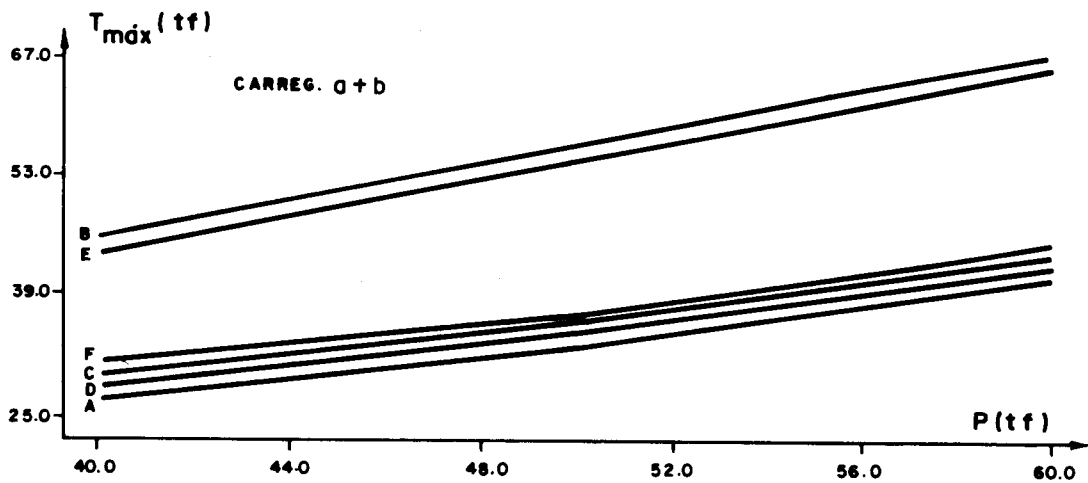
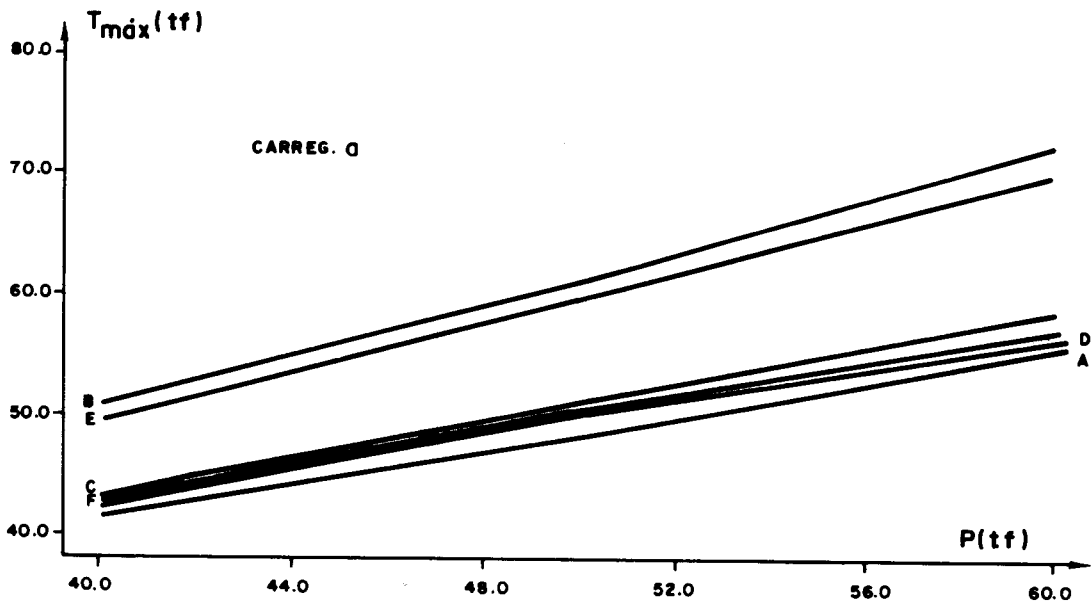
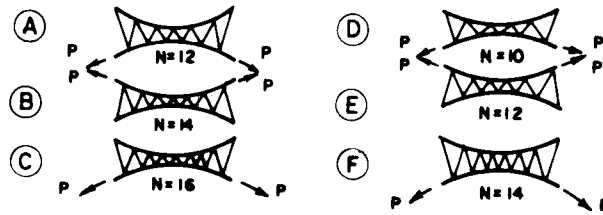


FIG. 4.23 - T_{\max} no cabo portante

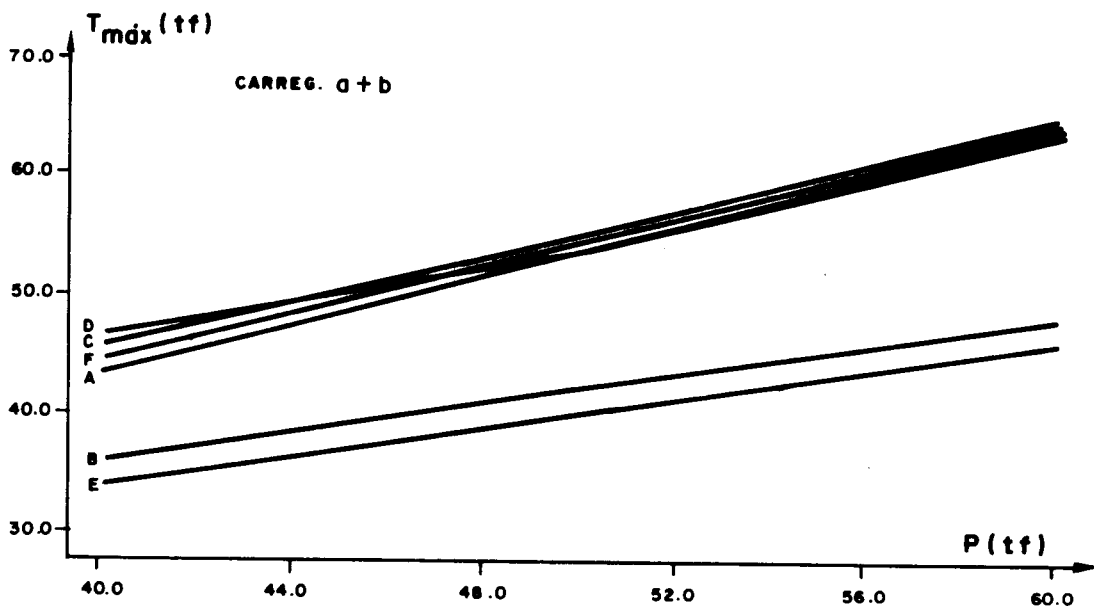
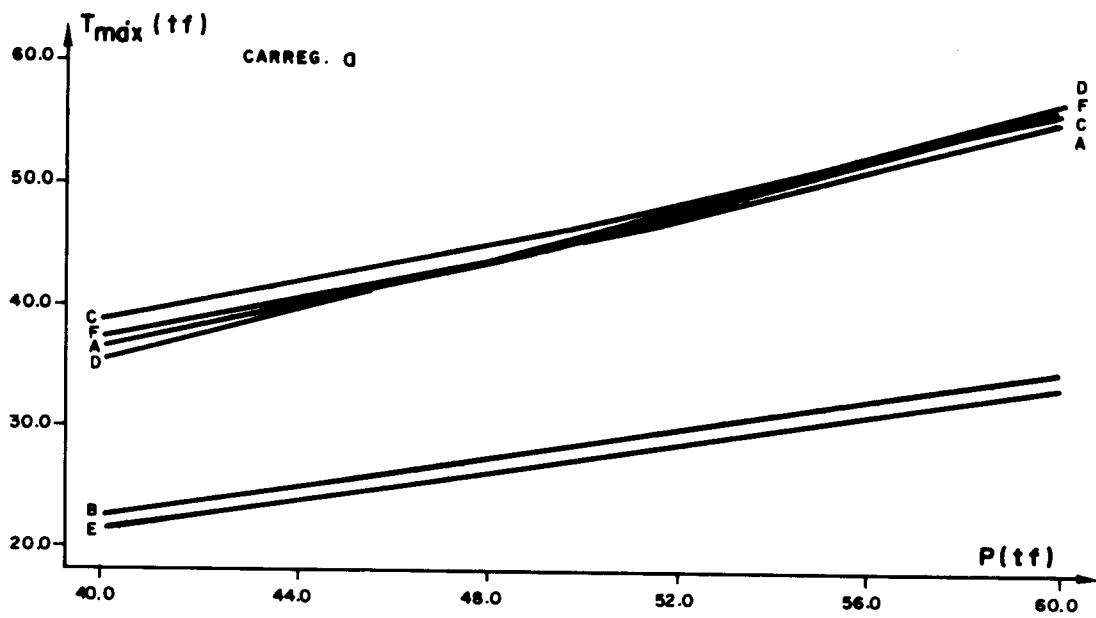


FIG. 4.24 - T_{\max} no cabo tensor

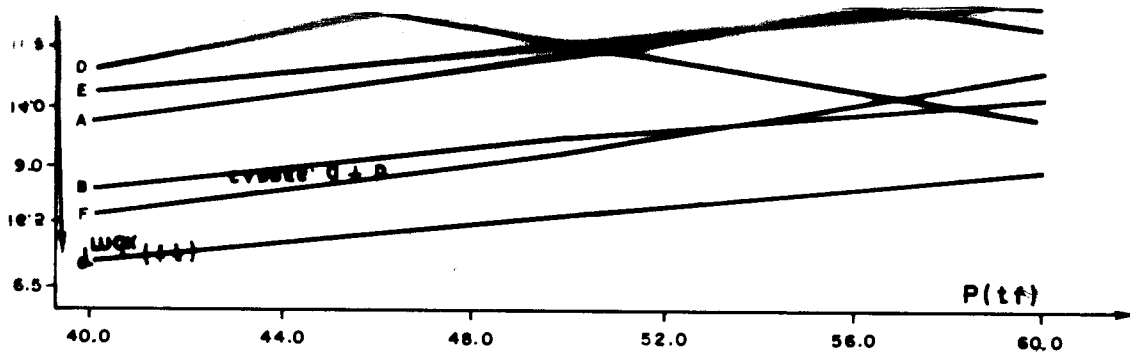
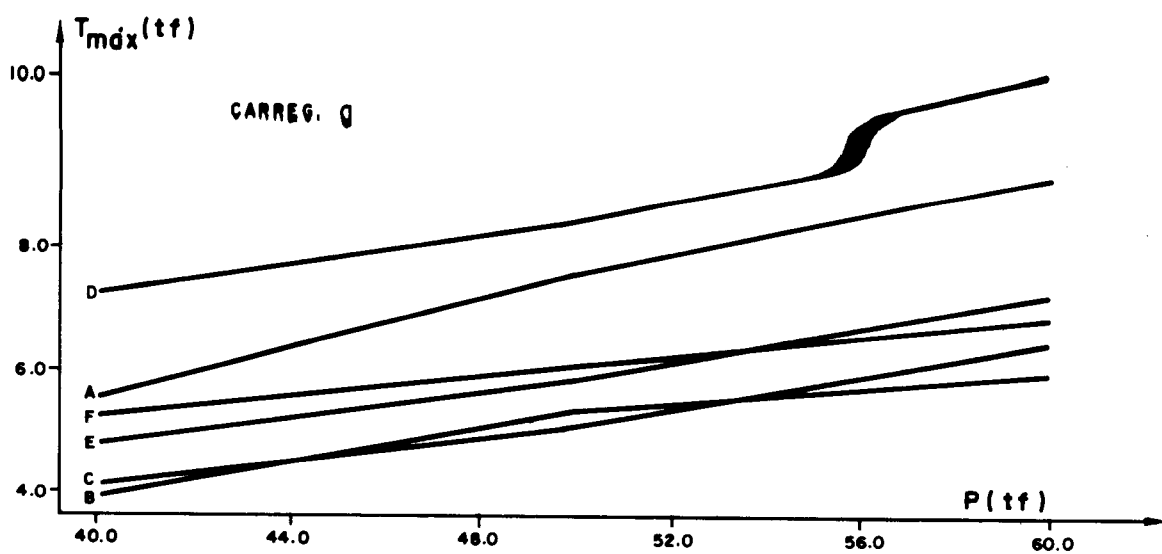


FIG. 4.25 - T_{\max} nas hastes diagonais

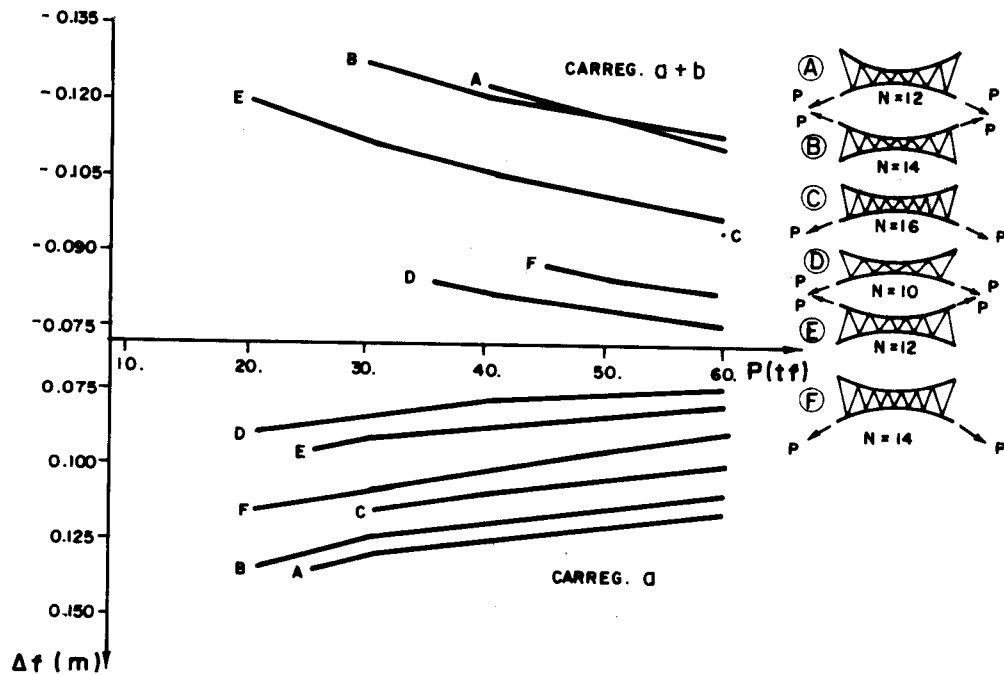


FIG. 4.26

II) *Variação da distância mínima entre os cabos principais (D)*

Fazendo-se variar a distância (D) entre os cabos portante e tensor, procura-se determinar a sua influência na variação do deslocamento no meio do vão e trações máximas do cabo-treliça. Considera-se o carregamento de 0,120 tf/m e o carregamento de 0,240tf/m.

As figuras 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 correspondem aos valores obtidos para cabos-treliça com $L = 60,0m$, $F1 = F2 = 4,0m$ e força de protensão aplicada $P = 40tf$.

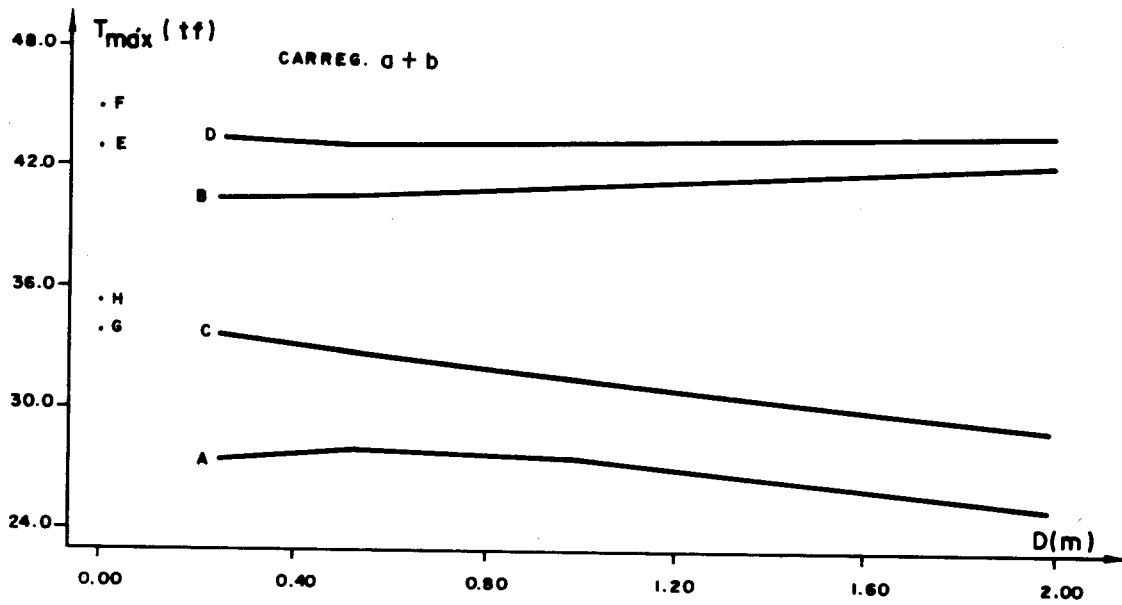
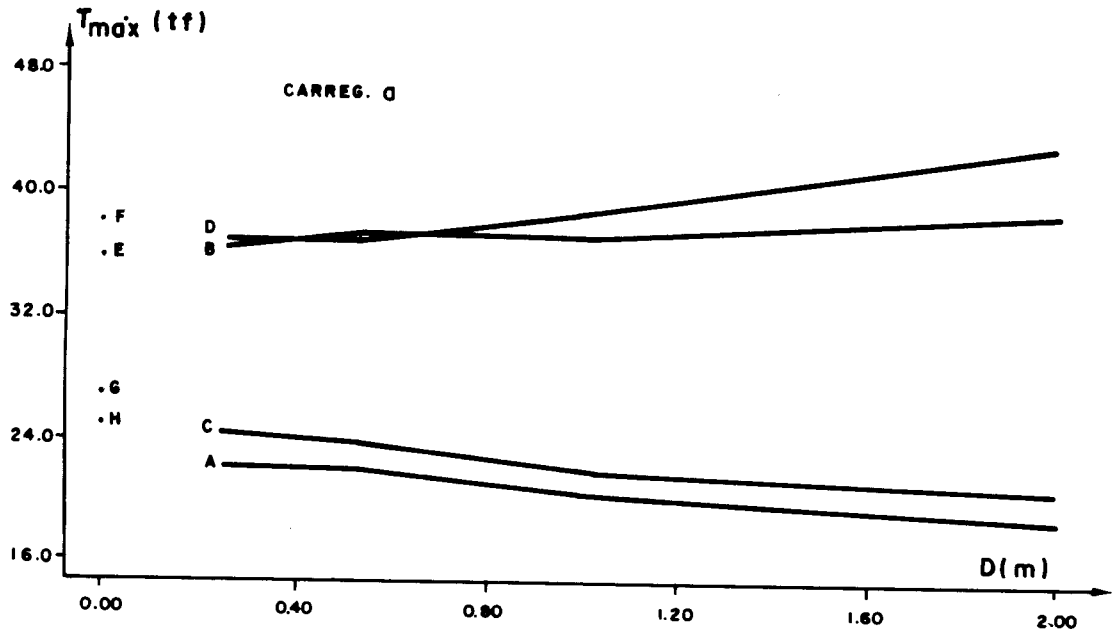


FIG. 4.28- T_{\max} no cabo tensor

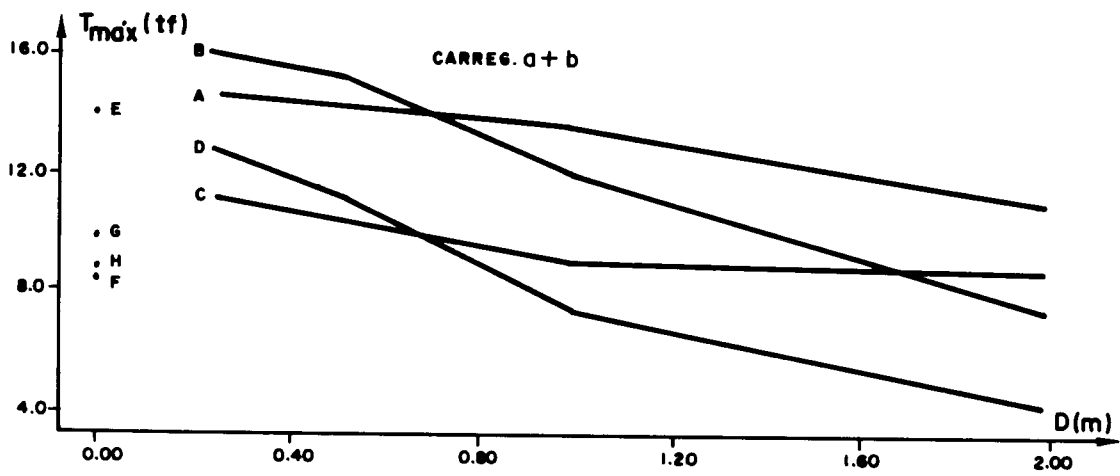
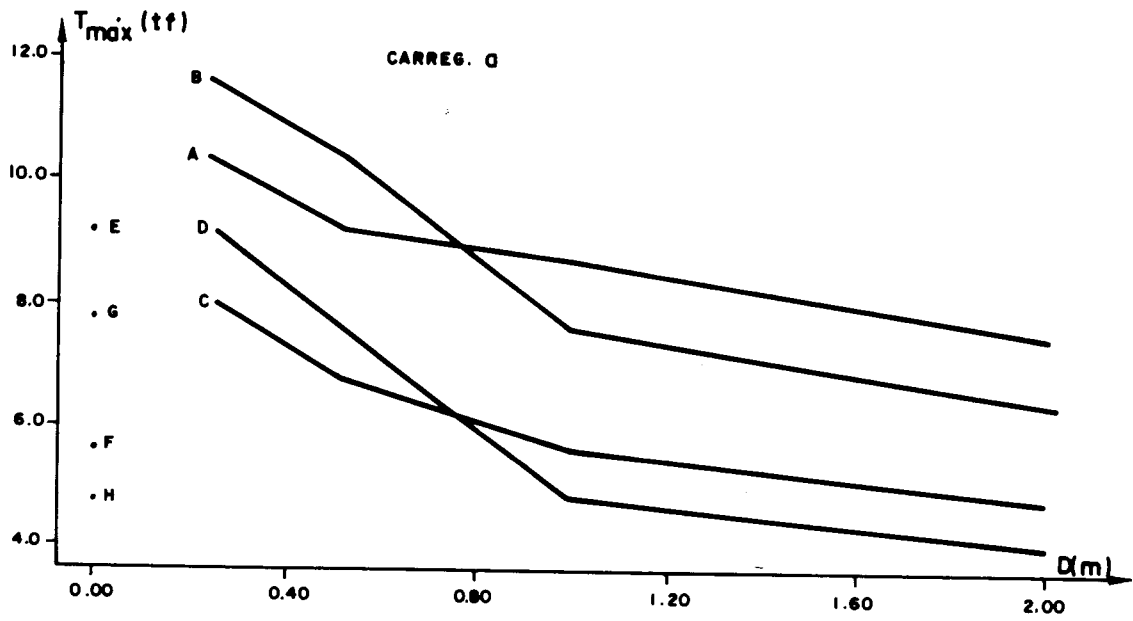


FIG.4.29 - T_{\max} nas hastes diagonais

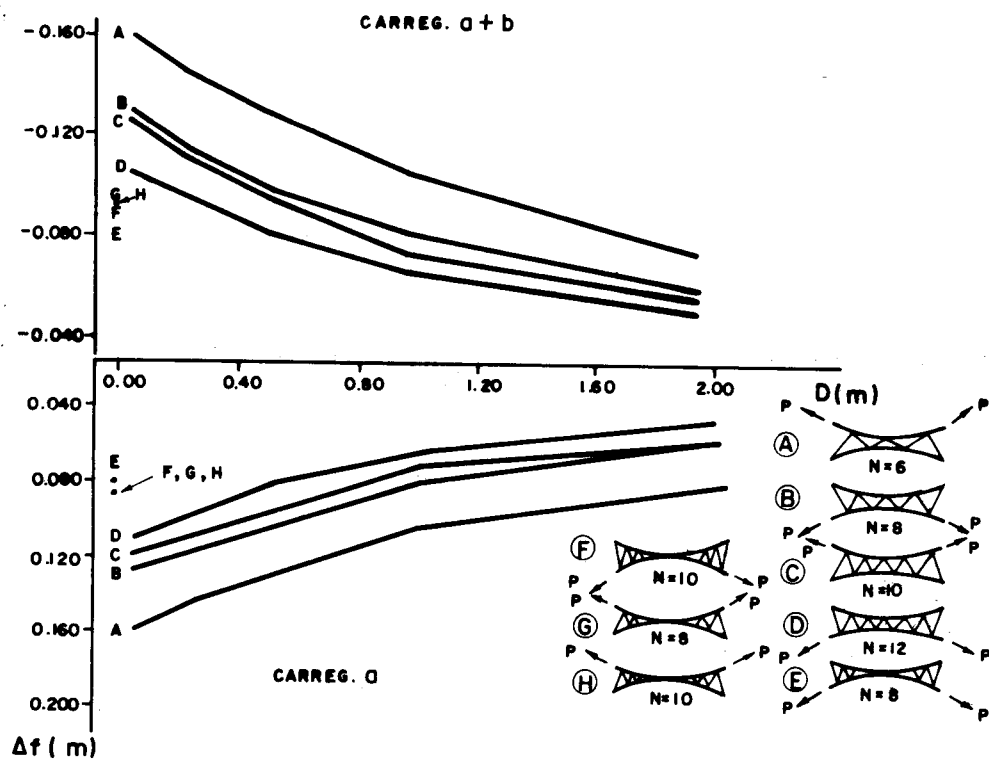


FIG. 4.30

Resultados de deslocamentos e trações máximas referentes aos cabos-treliça com $L = 80,0\text{m}$, $F_1 = F_2 = 5,5\text{m}$ e $P = 40\text{tf}$ encontram-se nas figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34.

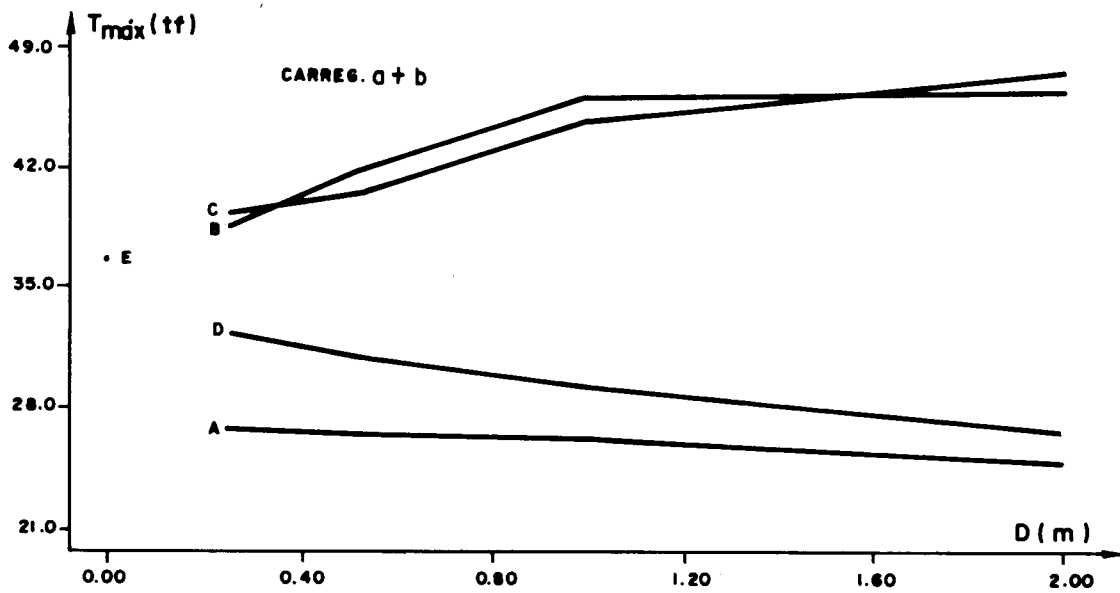
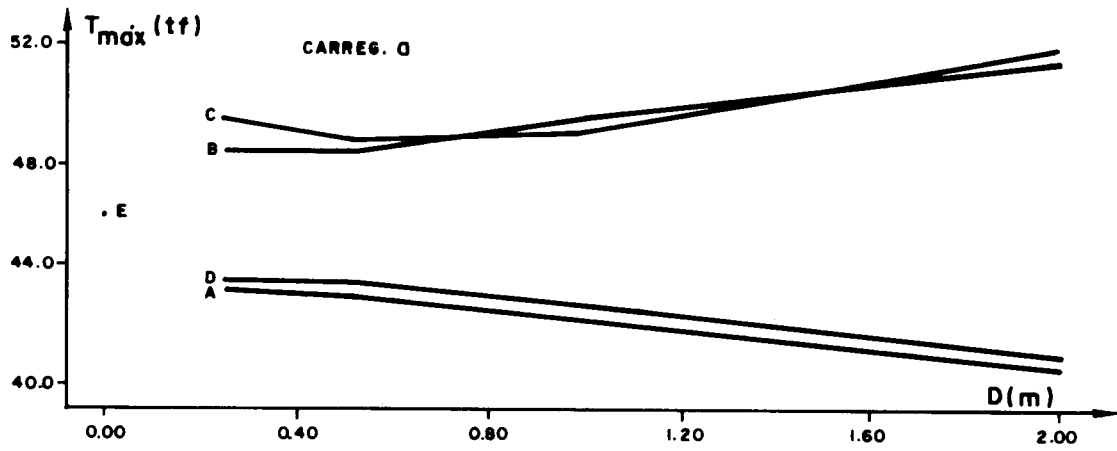
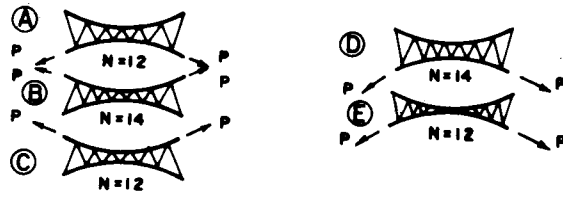


FIG. 4.31 - T_{\max} no cabo portante

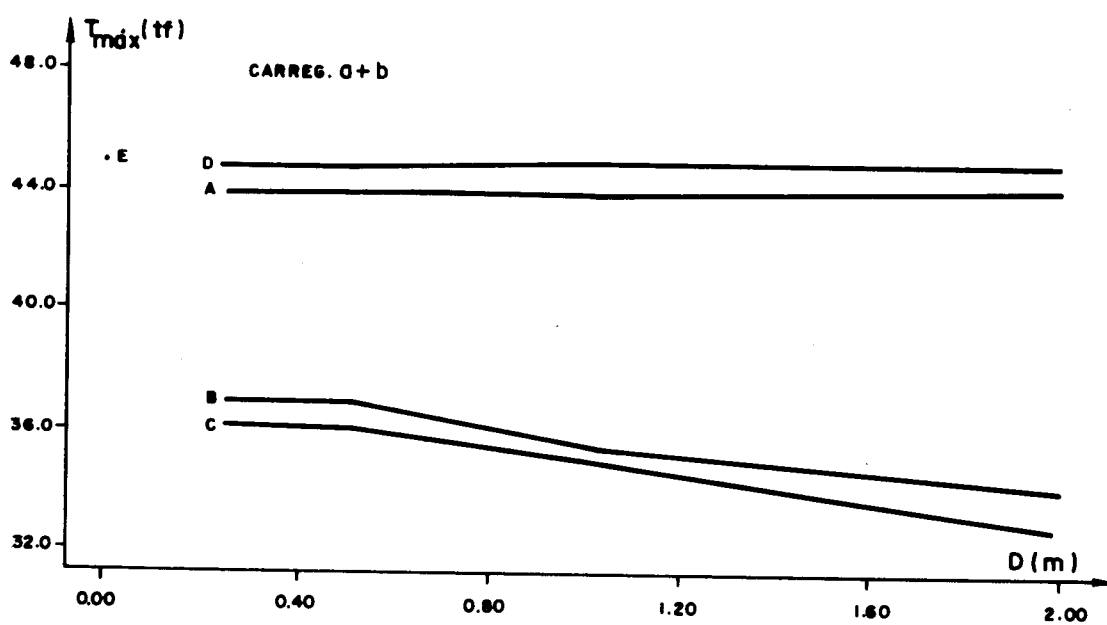
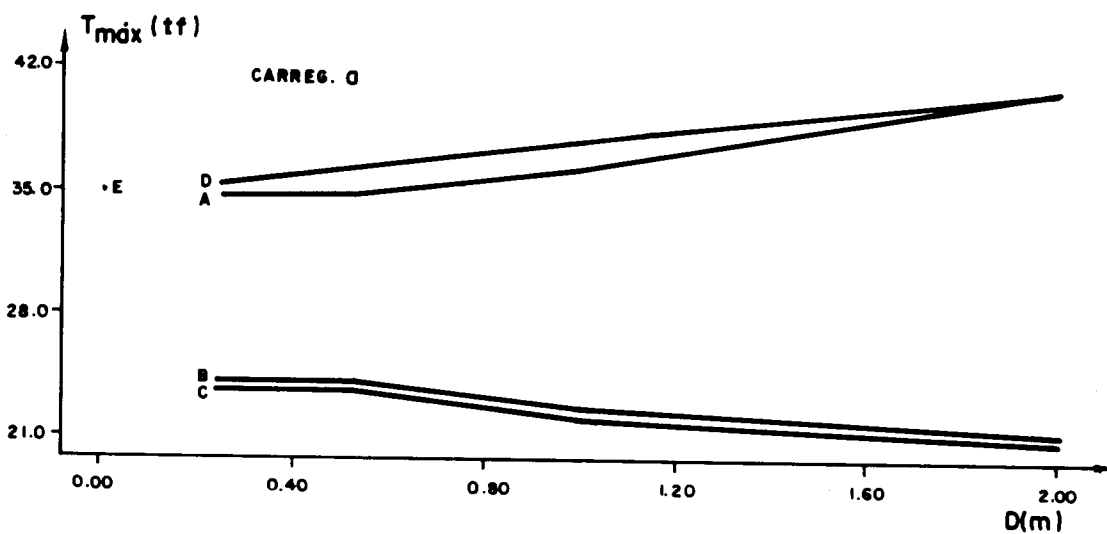


FIG. 4.32 - T_{\max} no cabo tensor

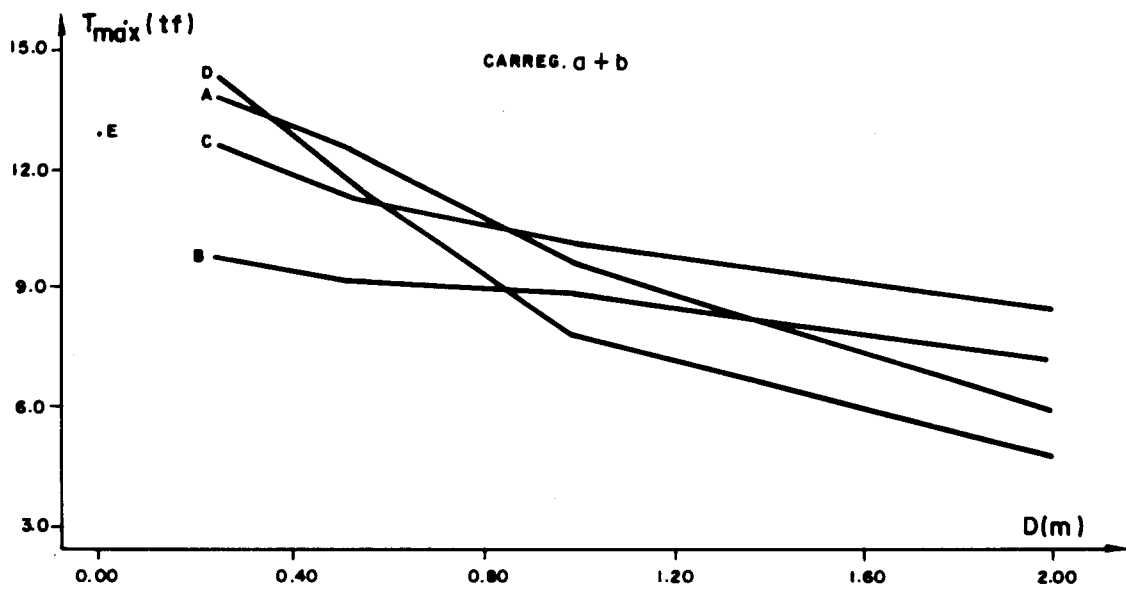
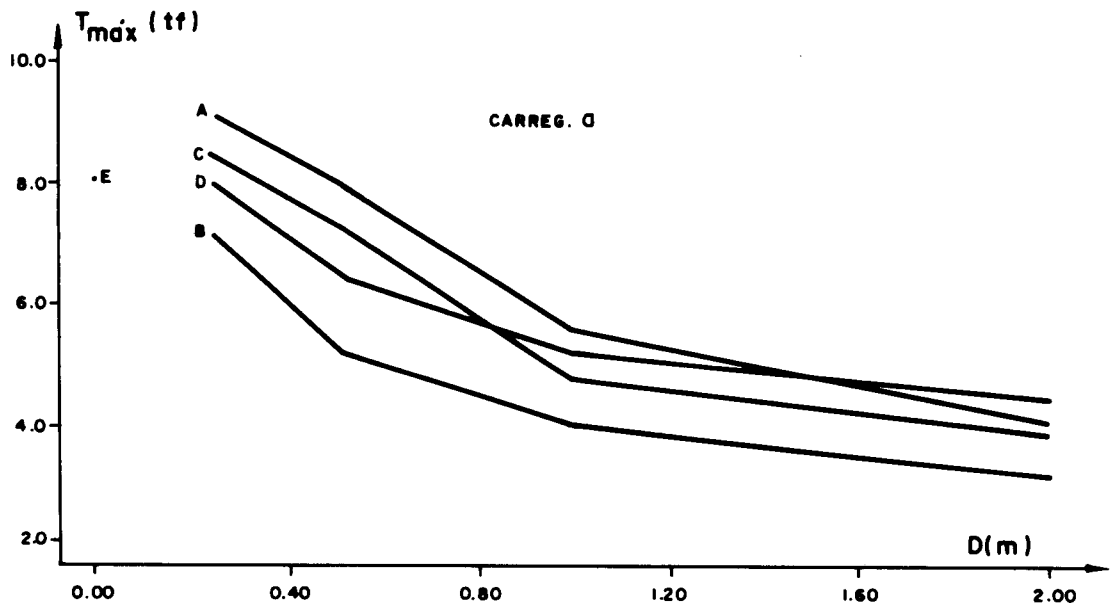


FIG.4.33- T_{\max} nas hastes diagonais

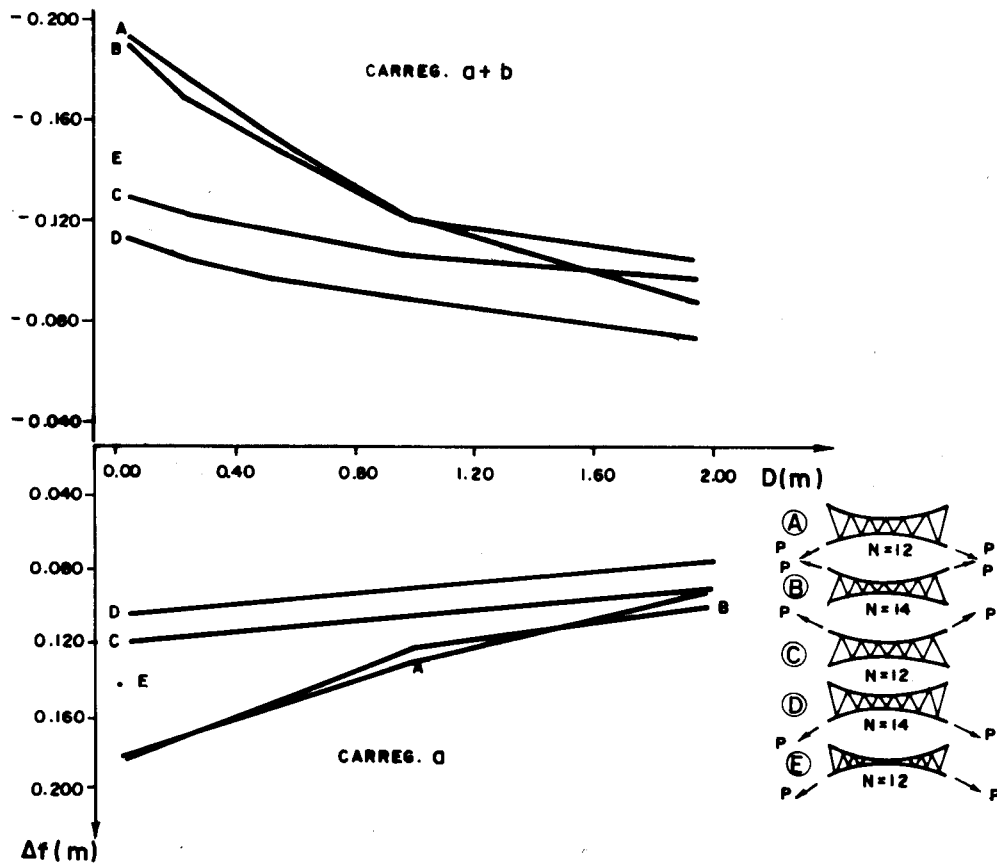


FIG. 4.34

III) *Variação das flechas dos cabos portante (F1) e do cabo tensor (F2)*

As figuras 4.35 e 4.36 representam os resultados para os deslocamentos máximos do cabos-treliça de 60,0 e 80,0m de vão, respectivamente, com a variação das flechas dos cabos principais.

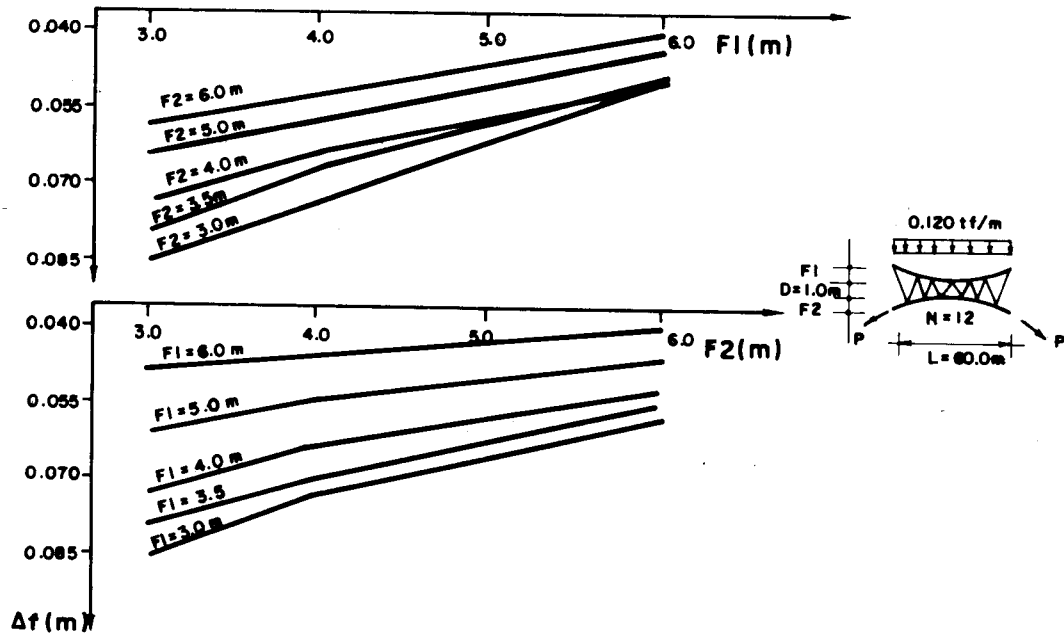


FIG. 4.35

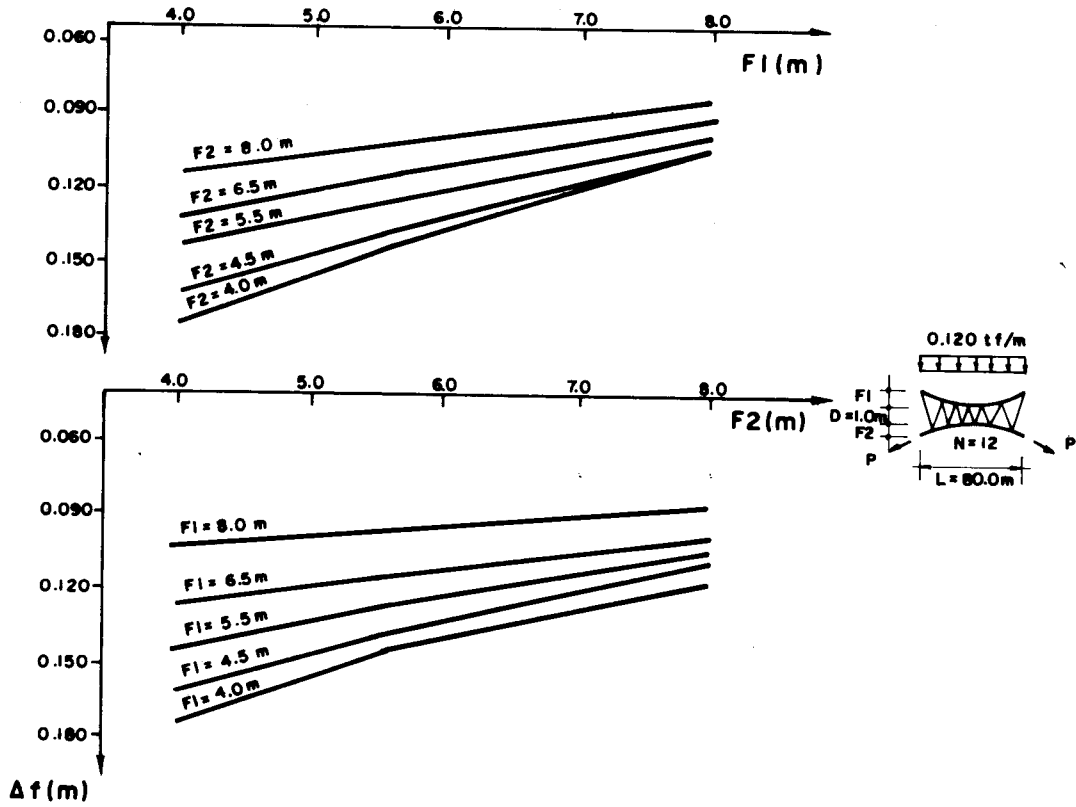


FIG. 4.36

4.1.2.2 - Experimentações do segundo tipo

As estruturas, neste caso, são submetidas ao carregamento uniformemente distribuído de $0,120 \text{ tf/m}$ (carregamento a) e aos carregamentos variáveis c e d, conforme mostra a figura 4.37.

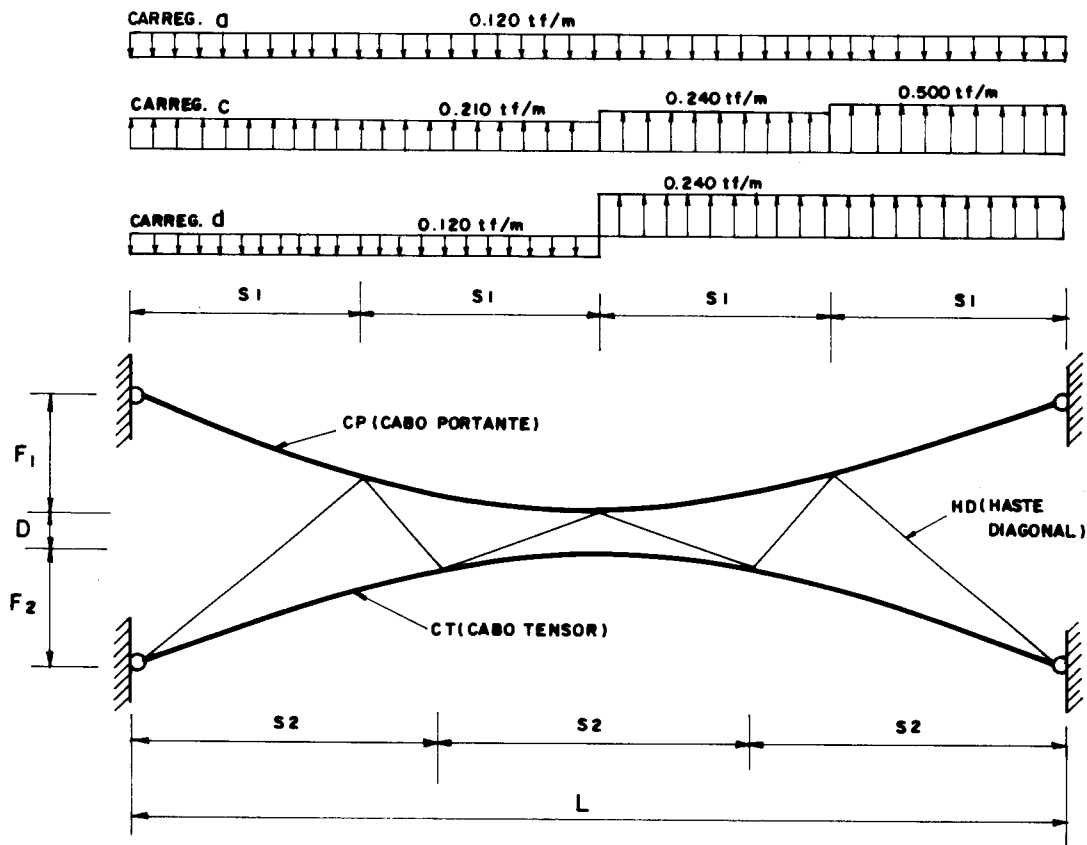


FIG. 4.37

São analisados os deslocamentos para três diferentes cabos-treliça com 60,0m de vão (figura 4.38) e outros três cabos-treliça com 80,0m de vão (figura 4.39).

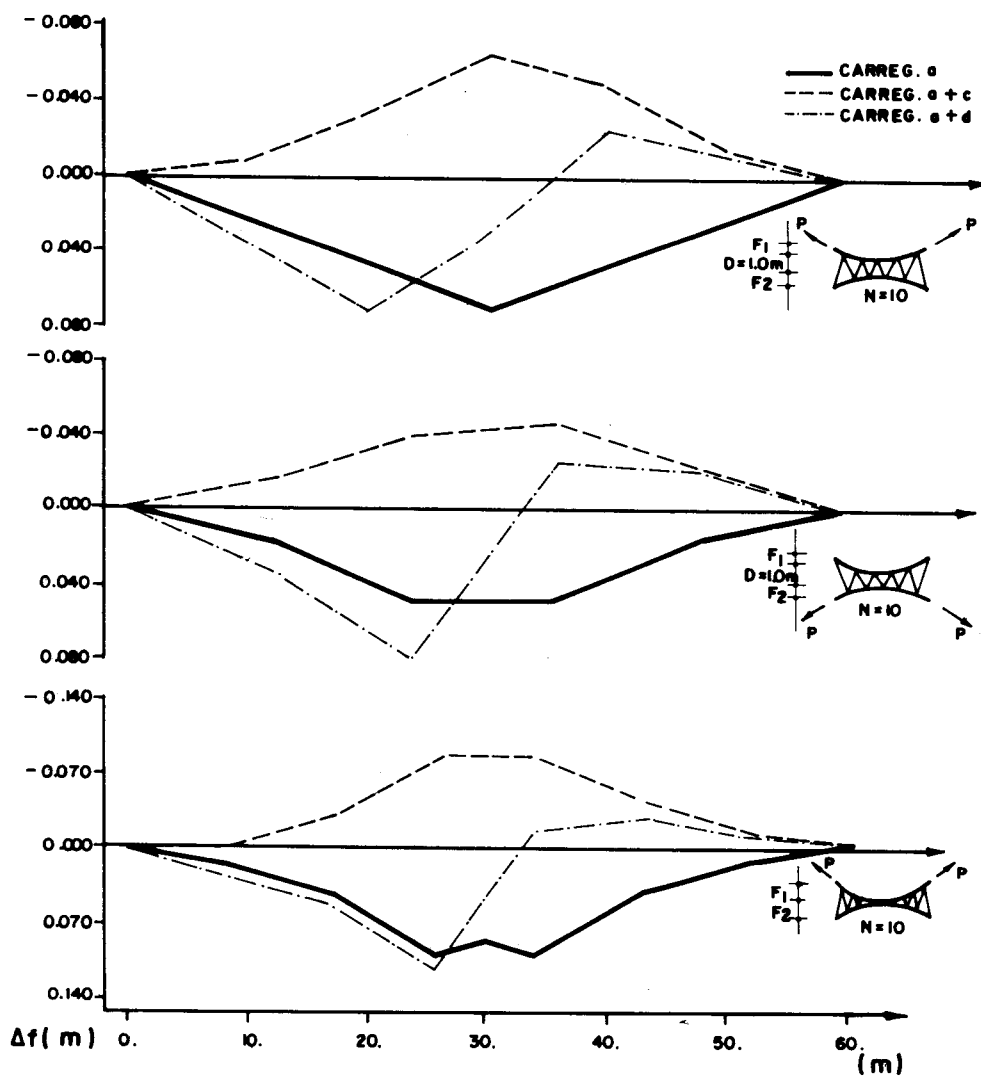


FIG. 4.38

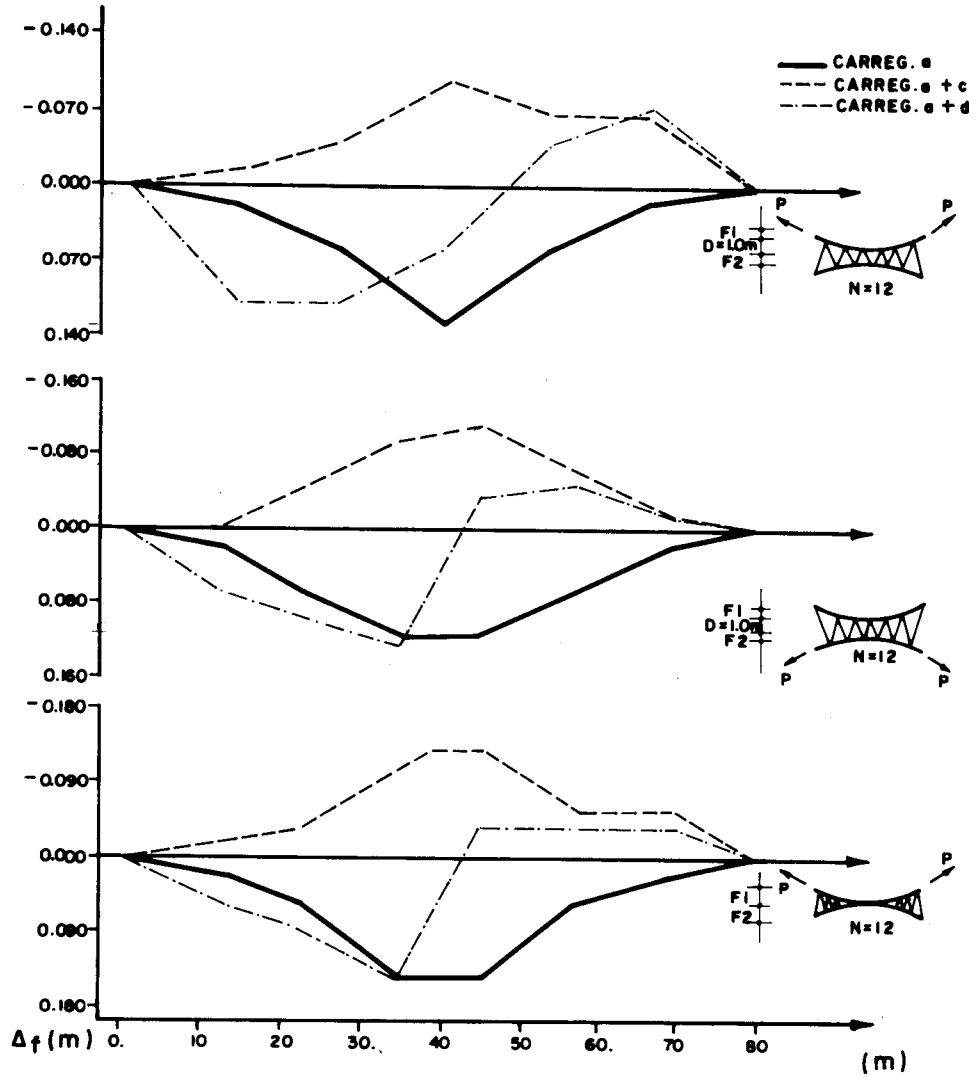


FIG. 4.39

4.2 - CABOS-TRELIÇA COM CARREGAMENTOS DINÂMICOS

A experimentação dinâmica é feita procurando-se determinar a influência da variação das áreas dos cabos principais e das hastes de ligação na grandeza dos deslocamentos dos cabos-treliça. São considerados cabos com 80,0m de vão, 14 diagonais e suspensos por 2 pilares metálicos atirantados ao solo como mostra a figura 4.40. Os esforços de protensão estão indicados na figura 4.41.

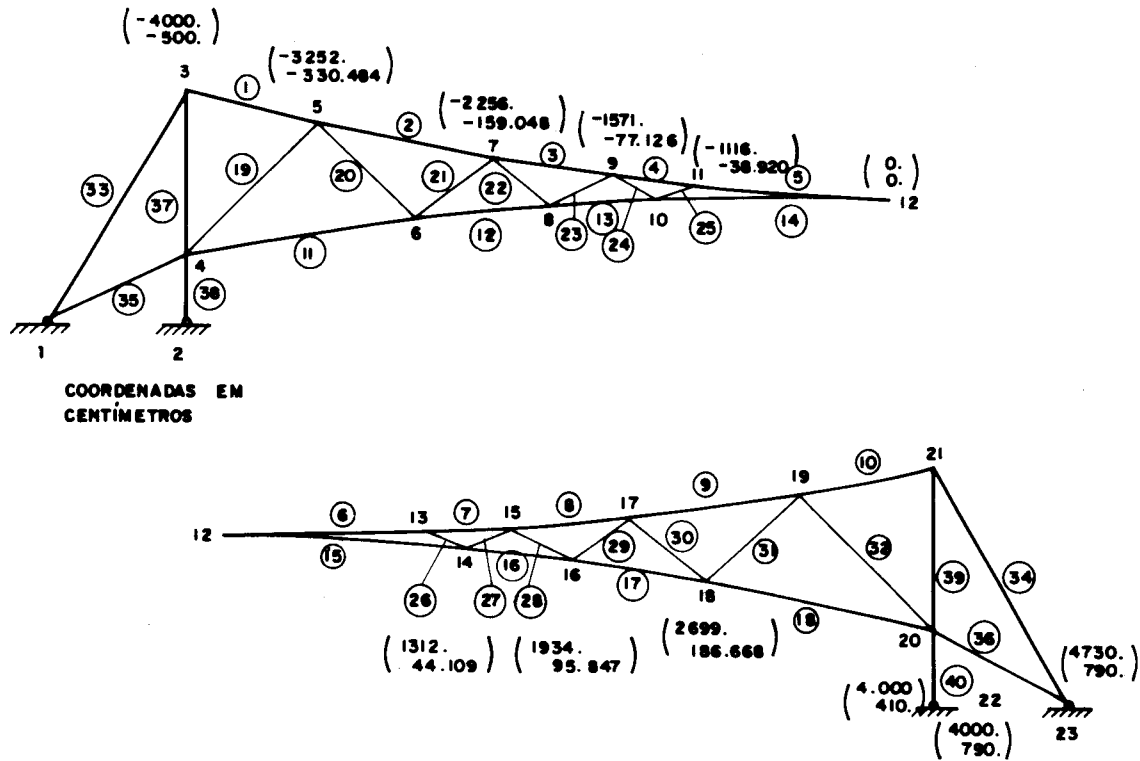


FIG. 4.40

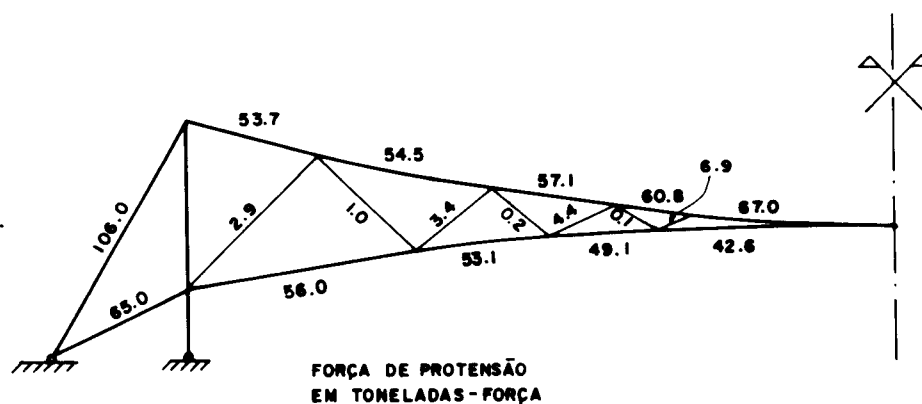


FIG. 4.41

Admite-se o m̃odulo de elasticidade para os cabos e pilares de 1.500tf/cm².

A ação dinãmica caracteriza-se por uma aceleração dada pela expressão:

$$a = \frac{g}{10} \text{ sen}(\pi t)$$

Para o valor do intervalo de integração (Δt) admite-se o valor de 0,005s e duração de atuação da carga de 1,0s.

Para o primeiro cabo-treliça empregam-se para as áreas do cabo portante, cabo tensor e hastes os valores 25,10cm², 17,20cm² e 2,84cm² respectivamente. O segundo cabo-treliça tem área de cabo portante igual a 18,82cm², área de cabo tensor igual a 12,90cm² e área das diagonais igual a 2,13cm². O terceiro cabo-treliça, possui os cabos com metade da área utilizada para o primeiro, ou seja, 12,55cm², 8,60cm² e 1,42cm² correspondendo aos cabos portante, tensor e hastes de ligação, respectivamente.

A partir do programa elaborado e de acordo com os dados estabelecidos, obtêm-se os resultados que constam dos gráficos das figuras 4.42, 4.43, 4.44 e 4.45.

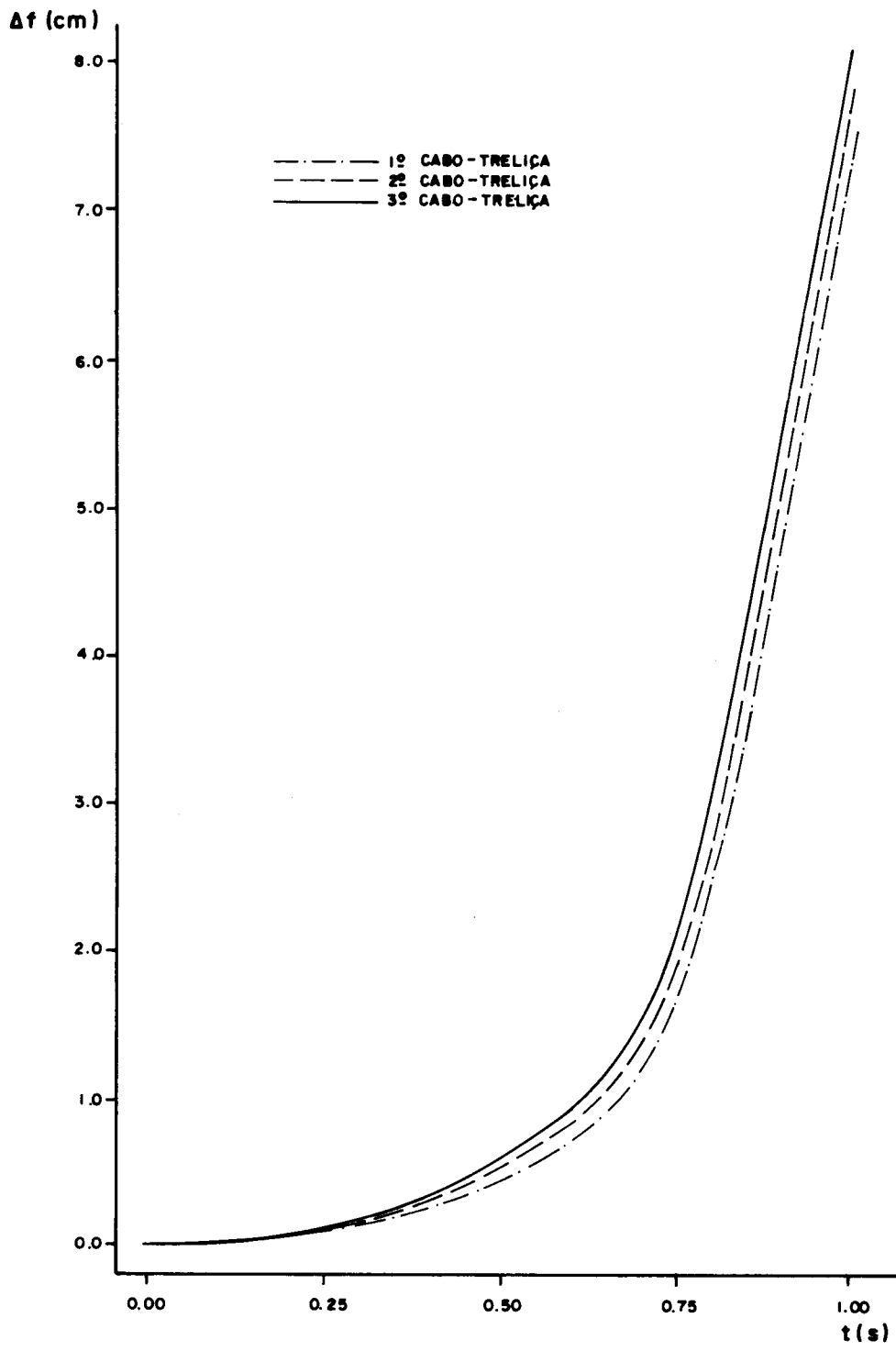


FIG. 4.42

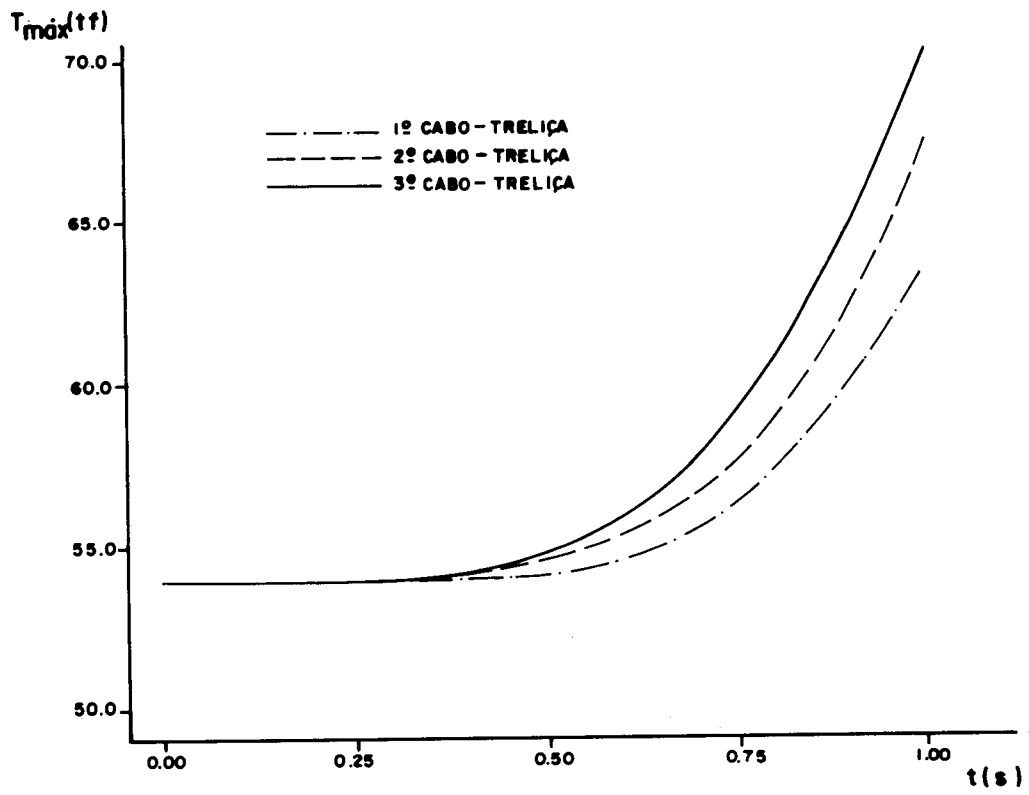


FIG. 4.43 - T_{\max} no cabo portante

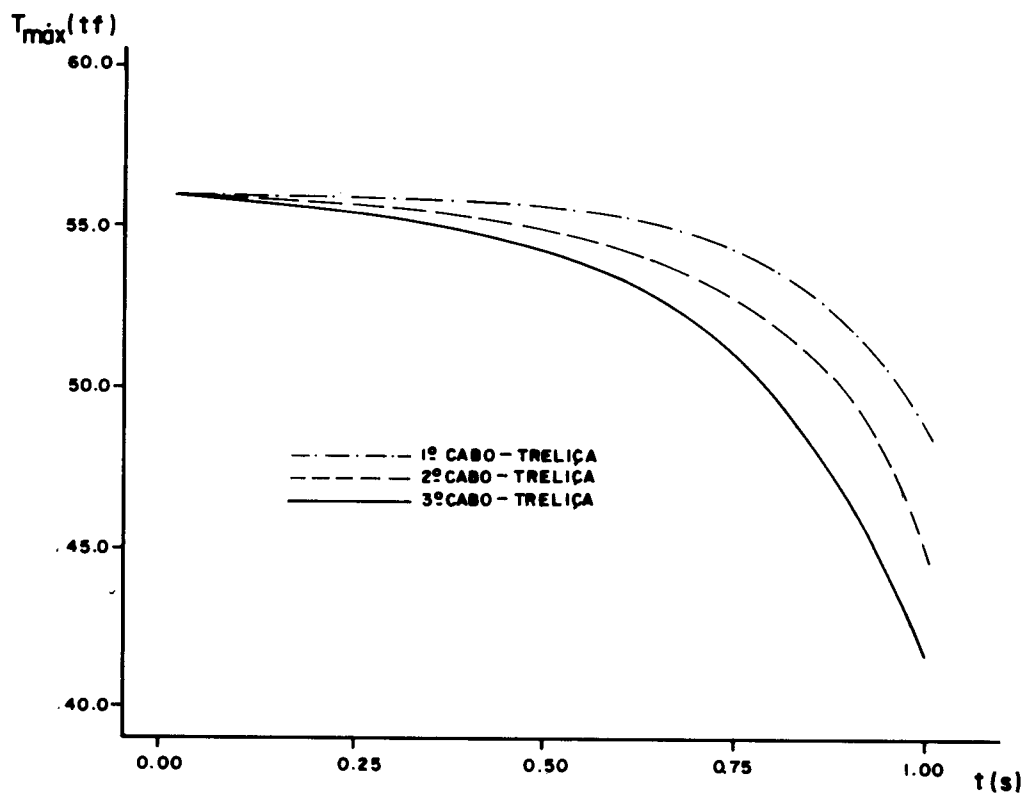


FIG. 4.44 - T_{\max} no cabo tensor

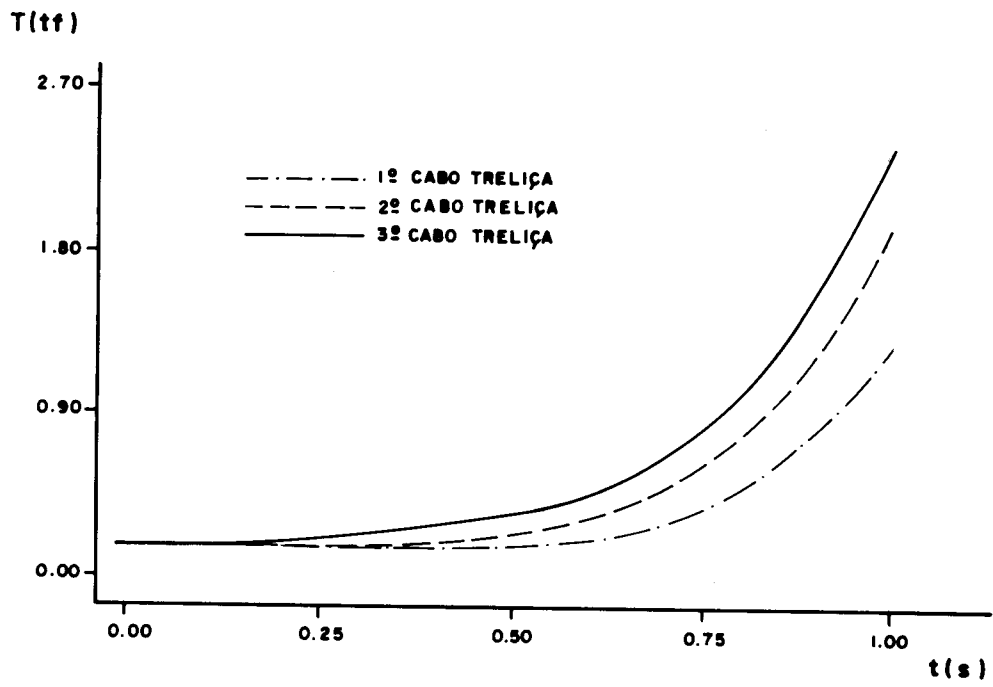


FIG.4.45 - Tração na diagonal 22

5. OBSERVAÇÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados obtidos no capítulo anterior traduzidos em gráficos permitem obter as seguintes informações a respeito do comportamento do cabo-treliça:

5.1 - CABO-TRELIÇA COM HASTES VERTICAIS

O gráfico da figura 4.2 mostra que à medida que se aumenta a força de protensão, o deslocamento máximo no meio do vão (Δf) para o cabo portante, devido ao carregamento distribuído (q), diminui. Convém lembrar, todavia, que um estado de protensão elevado pode conduzir a cabos com seção transversal que podem tornar a estrutura anti-econômica. Além disso, pode resultar em estruturas de apoio de grandes dimensões. O gráfico da figura 4.3 mostra a variação da força de tração máxima no cabo portante e no cabo tensor, devido a aplicação da força de protensão (p) e devido ao carregamento distribuído (q). Nota-se que o carregamento aplicado faz diminuir a tração no cabo tensor e aumentar a tração no cabo portante. Estas variações, que são praticamente lineares, são de maior intensidade para o cabo portante que para o cabo tensor. O gráfico da figura 4.4 mostra que as trações nas hastes, de igual intensidade para todas elas, tendem a aumentar com o acréscimo da força de protensão. A aplicação do carregamento faz reduzir a força de tração em

todas as hastes. No caso particular da primeira haste, para uma protensão de $0,5\text{tf/m}$, a redução da tração é da ordem de $0,47\text{tf}$. Para a mesma haste, o carregamento aplicado produz o destracionamento total quando a força de protensão é de $0,2\text{tf/m}$.

Com relação à variação do espaçamento (S) das hastes verticais, percebe-se na figura 4.5 que os deslocamentos máximos do cabo-treliça não se alteram praticamente, para espaçamentos entre $2,0\text{m}$ e $6,0\text{m}$. O gráfico da figura 4.6 também mostra que as trações no cabo portante e no cabo tensor não se alteram com o espaçamento das hastes. Com a aplicação do carregamento, a tração no cabo portante aumenta mais do que diminui a tração no cabo tensor. O gráfico da figura 4.7 mostra que o aumento do espaçamento, que corresponde a uma diminuição do número de hastes, faz com que as forças nas hastes aumentem. Com relação à variação da força de tração nas hastes, nota-se que espaçamentos maiores implicam em uma redução maior. De modo geral, pode-se afirmar que a variação do espaçamento das hastes verticais tem pouca influência no comportamento do cabo-treliça.

Quanto à variação da distância mínima (D) entre os cabos principais, observa-se na figura 4.8 que os deslocamentos máximos do cabo-treliça também pouco variam, para distâncias de conexão até $2,0\text{m}$. O gráfico da figura 4.9 mostra que as trações nos cabos portante e tensor permanecem praticamente constantes com a variação da distância D . Do mesmo modo que na variação do espaçamento (S), observa-se, que o aumento da tração no cabo portante é maior que a diminuição da tração no cabo tensor quando se aplica o carregamento distribuído (q). Com relação à variação da força de tração nas hastes, a figura 4.10 indica uma queda constante quando o carregamento é aplicado. É importante notar que as flechas nos cabos portante e tensor não são variadas quando se aumenta a distância entre esses cabos.

Com relação à variação das flechas dos cabos tensor e portante, pode-se concluir que flechas maiores implicam em deslocamentos menores. Assim, para valores crescen-

tes de $D1 = D2$ e $F2 = 3,0m$, o que implica no aumento de $F1$, observa-se uma redução na variação da flecha Δf . Do mesmo modo, para $F1 = 3,0m$, o que implica em valores crescentes de $F2$, observa-se também uma redução nos valores dos deslocamentos Δf . Observa-se ainda, que flechas maiores no cabo portante produzem deslocamentos menores. No caso particular de $D1 = D2 = 9,0m$, encontra-se $\Delta f = 75,7cm$ quando $F2=3,0m$ e $F1 = 5,0m$, $\Delta f = 87,1cm$ quando $F2 = F1 = 4,0m$ e $\Delta f=91,9cm$ quando $F2 = 5,0m$ e $F1 = 3,0m$ (ver figura 4.11). Com respeito às forças de tração nos cabos portante e tensor, figura 4.12, percebe-se que para $D1 = D2$ crescente e $F1$ constante, o que implica em $F2$ crescente, as forças de tração máxima diminuem. Por outro lado, para $D1 = D2$ crescente e $F2$ constante, o que implica em $F1$ variável, ocorre um aumento da força de tração máxima no cabo tensor e uma redução da força de tração máxima do cabo portante. Quando se considera $D1 = D2$ constante e se faz variar $F1$ e $F2$, observa-se que a redução de $F1$ e aumento de $F2$ implica em redução tanto no cabo portante como no cabo tensor. A figura 4.13, que representa a variação da tração nas hastes verticais, indica que esta diminui quando se faz $D1 = D2$ crescente e $F1$ constante, ou seja, aumenta-se $F2$. Ocorre o contrário, isto é, um aumento da tração nas hastes, quando se faz $D1 = D2$ crescente e $F2$ constante, ou seja, aumenta-se $F1$.

Observando os gráficos das figuras 4.15, 4.16 e 4.17, com relação ao carregamento a, nota-se que os maiores deslocamentos ocorrem para cabos-treliça com relação flecha-vão $1/20$ e os menores deslocamentos para cabos-treliça com relação flecha-vão $1/10$. Para o cabo-treliça com $F1/L = 1/10$ e $F2/L = 1/20$, a figura 4.17 mostra que os deslocamentos estão compreendidos entre os dois casos anteriores. Com relação ao carregamento a, o comportamento do cabo-treliça é análogo, observando-se maiores deslocamentos para o cabo-treliça da figura 4.15. Com relação ao carregamento b, dependendo da relação flecha-vão, pode ocorrer a inversão no sentido dos deslocamentos, como se nota nas figuras 4.16 e 4.17. Para o cabo da figura 4.15 não há a inversão dos

deslocamentos porque os deslocamentos verticais para baixo são de grande intensidade. Finalmente, para o carregamento d , observa-se, principalmente, que o sentido dos deslocamentos depende também da relação entre as ordenadas de carga. Assim, o gráfico da figura 4.16 mostra uma tendência a inverter o sentido do deslocamento, mesmo quando todo o carregamento é para baixo.

5.2 - CABO-TRELIÇA COM HASTES DIAGONAIS

Analisando os gráficos das figuras 4.19, 4.20 e 4.21, nota-se que a variação da força de tração nos cabos portante, tensor e hastes diagonais pode ser considerada linear com o aumento da protensão. Essas trações máximas, todavia, apresentam características diferenciadas conforme a protensão seja aplicada pelo cabo portante ou pelo cabo tensor. Observa-se que quando a protensão é dada pelo cabo portante, as trações aumentam com o aumento do número de diagonais. Isto acontece tanto para o carregamento a , como para o carregamento $a + b$, e para ambos os cabos: portante e tensor. Quando a protensão é aplicada pelo cabo tensor essa tendência se mantém. Com relação às diagonais essa tendência se inverte, observando-se que as forças de tração diminuem com o aumento do número de diagonais tanto para o carregamento a , como para o carregamento $a + b$. O gráfico da figura 4.22 mostra que os deslocamentos da estrutura diminuem com o aumento da força de protensão. Nota-se, contudo, que a partir de certos valores de P (força de protensão), não se observa reduções sensíveis do deslocamento para acréscimos desta força de protensão. O gráfico indica também o valor mínimo da força de protensão abaixo do qual ocorre o destracionamento de pelo menos uma das barras do cabo-treliça.

Os gráficos 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26, relativos ao cabo-treliça de 80m de vão, mostram que o seu comportamento, com relação a deslocamentos e trações máximas, se assemelha ao cabo-treliça de 60m, quando se faz variar a força de protensão. Obviamente, quando se aumenta o vão e se mantém o mesmo número de diagonais e a mesma força de protensão, ocorre para os carregamentos atuantes um acréscimo nos deslocamentos. Isso pode ser observado nos gráficos das figuras 4.22 (60m) e 4.26 (80m) para uma força de protensão de 40tf e cabos-treliça de 12 diagonais, curvas D (60m) e A (80m).

Analisando os gráficos das figuras 4.27 e 4.28, observa-se que o aumento do número de diagonais implica em aumento das forças de tração máxima para a mesma distância D e mesmo modo de protensão. A figura 4.27 mostra que no cabo portante, o aumento da distância D faz aumentar a força de tração quando a protensão é aplicada pelo cabo portante e faz reduzir a força de tração quando a protensão é aplicada pelo cabo tensor. O gráfico da figura 4.28 mostra, que no cabo tensor, o aumento da distância D faz reduzir a força de tração quando a protensão é aplicada pelo cabo portante, e faz aumentar as trações quando a protensão é aplicada pelo próprio cabo tensor. Como se pode observar os cabos portante e tensor se comportam de maneira diferente dependendo da forma de aplicação da força de protensão. Com relação à força de tração nas hastes diagonais, figura 4.29, observa-se que o aumento da distância D implica numa redução das trações máximas nas diagonais. Nota-se, também, que dependendo da forma de aplicar a protensão existe uma diferença no andamento das variações. Isso pode ser observado quando se analisa o paralelismo das curvas B e D, com relação ao paralelismo das curvas A e C. O gráfico da figura 4.30 mostra que os deslocamentos diminuem com o aumento da distância de conexão entre os cabos. Como se pode observar o aumento do número de diagonais aumenta a rigidez do cabo-treliça, reduzindo, portanto, os seus deslocamentos. Para cabos conectados no meio do vão ($D = 0$), os deslocamentos

praticamente não sofrem influência do número de diagonais e forma de protensão. Nota-se, também, que é necessário que se imponha à distância D valores relativamente grandes, para que cabos não conectados no meio do vão apresentem os deslocamentos da mesma ordem de grandeza dos cabos conectados.

Os gráficos 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34, correspondentes ao cabo-treliça de 80m de vão, indicam que o seu comportamento com relação a deslocamentos e trações máximas é análogo ao cabo-treliça de 60m. No entanto, cabos conectados no centro ($D = 0$) podem apresentar deslocamentos maiores que cabos não conectados, mesmo para distâncias D pequenas.

Os gráficos das figuras 4.35 e 4.36 mostram que o deslocamento máximo apresenta variação praticamente linear quando se faz variar as flechas F1 e F2. Além disso, observa-se que o aumento das flechas F1 e F2 implica em redução dos deslocamentos. Considerando-se, por exemplo, $F1 = 5,0m$, obtém-se $\Delta f = 0,061m$ para $F2 = 3,0m$ e $\Delta f = 0,046m$ para $F2 = 6,0m$, para cabos-treliça de 60m. No caso de cabos-treliça de 80m de vão, os deslocamentos também se reduzem com o aumento das flechas F1 e F2.

Os gráficos das figuras 4.38 e 4.39, correspondentes aos cabos-treliça de 60 e 80m, mostram que a variação do vão não causa alteração na configuração das curvas de deslocamentos. Evidentemente, a intensidade dos deslocamentos para o cabo de 80m é maior com relação à forma de protensão, observa-se que para os carregamentos a e a + c, o cabo-treliça apresenta menores deslocamentos quando a protensão é dada pelo cabo tensor. Todavia, para o carregamento a + d, os deslocamentos diferenciais, medidos pela inclinação das curvas, são mais intensos para o cabo-treliça protendido pelo cabo tensor. Essa ocorrência de deslocamentos diferenciais, que podem ser grandes, deve ser considerada no projeto do sistema de vedação.

5.3 - CABO-TRELIÇA COM CARREGAMENTO DINÂMICO

O gráfico da figura 4.42, que relaciona o deslocamento com o tempo, mostra que para os três cabos-treliça estudados, os deslocamentos crescem lentamente no início e assumem rápido crescimento no final do intervalo de aplicação do carregamento. Observa-se, também, que para valores de t no fim do intervalo, a diferença entre os deslocamentos dos três cabos é mais intensa. Como era esperado, o cabo-treliça de maior rigidez apresenta valores de deslocamentos menores para qualquer valor de t . Com relação aos esforços, gráficos 4.43, 4.44 e 4.45 nota-se a mesma tendência de variação mais intensa no final do intervalo. Observa-se aumento da força de tração no cabo portante e diminuição da força de tração no cabo tensor. De fato, a força de tração no cabo portante passou de 53tf para 70tf (1ª cabo-treliça), 67tf (2ª cabo-treliça) e 63tf (3ª cabo-treliça). Por sua vez, a força no cabo tensor passou de 56tf para 42tf (1ª cabo-treliça), 45tf (2ª cabo-treliça) e 49tf (3ª cabo-treliça). A força na diagonal é crescente com o tempo.

5.4 - COMENTÁRIOS FINAIS

Dando continuidade à pesquisa do comportamento do cabo-treliça, pretende-se analisar essa estrutura considerando outros tipos de carregamento, variações de temperatura, recalques de apoio. É necessário, também, analisar o comportamento de cabos-treliça desnivelados, com hastes paralelas não verticais e áreas variáveis. Além disso, o efeito das solicitações dinâmicas deve ser melhor investigado.

APÊNDICE A

PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN PARA A ANÁLISE
ESTÁTICA DE CABOS-TRELIÇA

A.1

```

C----
C ANALISE DE CABOS-TRELICA POR PROCESSO DISCRETO
C ANALISE ESTATICA
C CALCULO DOS DESLOCAMENTOS DOS NÓS E ESFORÇOS NOS ELEMENTOS
C----
      IMPLICIT REAL*8(A-F,L,C-Z)
      REAL*8  IZ(120),M1,M2
      INTEGER ADJ(99,5),KD(297)
      DIMENSION X(99),Y(99),Z(99),E(120),A(120),NTIPO(120),IW(3),JW(3),
      *NI(120),NF(120),N(99),LI(120),L(120),CUS(120),SEN(120),SD(120),
      *PX(99),PY(99),PZ(99),DQ(297),DCX(99),DCY(99),DCZ(99),T(120),
      *TI(120),RIG(297,297),RE(6,6),D(6),F(6,120),SI(120),P(120),R(120),
      *DX(99),DY(99),DZ(99),DEF(120),DEFT(120),G(120)
      OPEN(UNIT=1,STATUS='OLD',FILE='DADOS',ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FD
      *RMATTED')
      WRITE(3,5)
5      FORMAT(5X,'CALCULO DE CABOS-TRELICA POR PROCESSO DISCRETO')
      WRITE(3,15)
15     FORMAT(5X,45('='),//)
C
C LEITURA DO NUMERO DE ESTRUTURAS A SEREM CALCULADAS
C
      READ(1,10)NES
10     FORMAT(I5)
      WRITE(3,25)NES
25     FORMAT(5X,'NUMERO DE ESTRUTURAS CALCULADAS',I3,//)
      DO 11 NES1=1,NES
      WRITE(3,35)NES1
35     FORMAT(5X,'ESTRUTURA NUMERO',I3,/)
C
C LEITURA DAS CARACTERISTICAS DA ESTRUTURA NO ESTADO INICIAL
C (COM PROTENSAO)
C
      READ(1,20)VL,F1,F2,E1,E2,D1,D2
20     FORMAT(10F8.0)
      WRITE(3,45)
45     FORMAT(5X,'CARACTERISTICAS DA ESTRUTURA CALCULADA',//)
      WRITE(3,65)VL
65     FORMAT(5X,'VAO LIVRE',F8.2,/)
      WRITE(3,75)F1
75     FORMAT(5X,'FLECHA DO CABO PORTANTE',F8.2)
      WRITE(3,85)F2
85     FORMAT(5X,'FLECHA DO CABO TENSOR',F8.2,/)
      WRITE(3,95)E1
95     FORMAT(5X,'DESNIVEL ENTRE ARRANQUES DO CABO PORTANTE',F8.2)
      WRITE(3,105)E2
105    FORMAT(5X,'DESNIVEL ENTRE ARRANQUES DO CABO TENSOR',F8.2,/)
      WRITE(3,115)D1,D2
115    FORMAT(5X,'DISTANCIA VERTICAL ENTRE OS ARRANQUES DOS CABOS A ESQOE
      *ROA E A DIREITA',2F8.2,//)
C
C LEITURA DO NUMERO DE NÓS, DE ELEMENTOS E DE NÓS INTERNOS
C
      READ(1,30)MNS,NEL,NNI
30     FORMAT(3I5)

```

```

      WRITE(3,165)NNCS,NEL,NNI
165  FORMAT(5X,'NUMERO DE NCS',15,/,5X,'NUMERO DE ELEMENTOS',15,/,5X,'N
      *UMERO DE NOS INTERNOS',15,/)
C  NCRD E O NUMERO DE COORDENADAS
      NCRD=3*NNOS
C
C  LEITURA DO NUMERO DE ELEMENTOS NOS CABOS PORTANTE E TENSOR
C
      REAL(1,40)NEL1,NEL2
40  FORMAT(2I5)
      WRITE(3,175)NEL1,NEL2
175  FORMAT(5X,'NUMERO DE ELEMENTOS NOS CABOS PORTANTE E TENSOR',2I5,//
      */)
C
C  LEITURA DO TIPO DE CABO
C  KAB=0 (CABO-TRELICA COM FASTES VERTICAIS)
C  KAB=1 (CABO-TRELICA COM DIAGONAIS)
C
      READ(1,50)KAB
50  FORMAT(I5)
C
C  LEITURA DO TIPO DE ESTRUTURA DE SUSTENTACAO
C  KSUST=0 (ESTRUTURA INDESLCCAVEL)
C  KSUST=8 (ESTRUTURA ATIRANTADA)
C  KSUST=4 (ESTRUTURA COM PILARES ENGASTADOS)
C
      READ(1,60)KSUST
60  FORMAT(I5)
C
C  LEITURA DO TIPO DE CONEXAO CENTRAL
C  KCCN=0 (CABOS PORTANTE E TENSOR NAO CONECTADOS)
C  KCCN=1 (CABOS PORTANTE E TENSOR CONECTADOS)
C
      READ(1,70)KCCN
70  FORMAT(I5)
      DO 1100 I=1,NNCS
          X(I)=0.0
          Y(I)=0.0
          Z(I)=0.0
          DX(I)=0.0
          DY(I)=0.0
          DZ(I)=0.0
1100  CONTINUE
          IF(KAB)33,22,33
22  CONTINUE
C
C  LEITURA DO ESPACAMENTO DOS TIRANTES (CONSTANTE)
C
      READ(1,80)S
80  FORMAT(F10.0)
      WRITE(3,195)S
195  FORMAT(5X,'ESPACAMENTO',F8.2,/)
C
C  GERACAO DAS COORDENADAS DOS NOS INTERNOS
C

```

```

      IF(KSUST)33,44,33
44    CONTINUE
      IF(KCCN)77,66,77
66    CONTINUE
      K1=NNI/2
      DO 88 K=1,K1
      X(2*K-1)=K*S
      Y(2*K-1)=-4*F1*X(2*K-1)**2/VL**2+E1*X(2*K-1)/VL+4*F1*X(2*K-1)/VL
      X(2*K)=K*S
      Y(2*K)=4*F2*X(2*K)**2/VL**2+E2*X(2*K)/VL-4*F2*X(2*K)/VL+D1
88    CONTINUE
      GO TO 99
77    CONTINUE
      K1=NEL1-1
      DO 111 K=1,K1
      X(2*K-1)=K*S
      Y(2*K-1)=-4*F1*X(2*K-1)**2/VL**2+E1*X(2*K-1)/VL+4*F1*X(2*K-1)/VL
111   CONTINUE
      K2=NEL2-2
      K3=NEL2/2
      K4=K3-1
      K5=K3+1
      DO 122 K=1,K4
      X(2*K)=K*S
122   CONTINUE
      X(2*K3)=X(2*K4)+2*S
      DO 133 K=K5,K2
      X(2*K)=X(2*K-2)+S
133   CONTINUE
      DO 144 K=1,K2
      Y(2*K)=4*F2*X(2*K)**2/VL**2+E2*X(2*K)/VL-4*F2*X(2*K)/VL+D1
144   CONTINUE
99    CONTINUE
C
C LEITURA DAS COORDENADAS DOS NOS DE APOIO
C
      NNIA=NNI+1
      DO 368 I=NNIA,NNOS
      READ(1,110)K,X(K),Y(K)
110   FORMAT(15,2F10.0)
368   CONTINUE
      GO TO 55
33    CONTINUE
C
C LEITURA DAS COORDENADAS DOS NOS
C
      DO 3688 I=1,NNOS
      READ(1,110)K,X(K),Y(K)
3688  CONTINUE
55    CONTINUE
      WRITE(3,205)
205   FORMAT(5X,'NUMERO DO NO',5X,'COORDENADA X',10X,'COORDENADA Y',/)
      DO 399 K=1,NNOS
      WRITE(3,215)K,X(K),Y(K)
215   FORMAT(10X,I3,10X,E12.4,10X,E12.4)

```

```

399  CONTINUE
C
C LEITURA DAS CARACTERISTICAS DOS ELEMENTOS
C A (SECAO TRANSVERSAL DOS ELEMENTOS)
C E (MODULO DE ELASTICIDADE DOS ELEMENTOS)
C IZ (MOMENTO DE INERCIA DOS PILARES)
C NTIPO = 1 (ELEMENTO DE CABO DE ACO)
C NTIPO = 2 (ELEMENTO COM RESIST. A ESFORCOS DE TRACAO E COMPRESSAO)
C NTIPO = 3 (ELEMENTO COM RESIST. A ESFORCOS DE FLEXAO)
C TI (FORCA AXIAL INICIAL)
C
  DO 577 J=1,NEL
    READ(1,130)I,NI(I),NF(I),L(I),A(I),IZ(I),NTIPO(I),TI(I)
130  FORMAT(3I5,3F10.0,15,F10.0)
577  CONTINUE
    WRITE(3,225)
225  FORMAT(/,5X,'BARRA',2X,'NO INICIAL',2X,'NO FINAL',6X,'MODULO ELAS
* ',6X,'SECAO TRANSV',6X,'MOM INERCIA',6X,'TIPO')
    DO 599 J=1,NEL
      WRITE(3,235)J,NI(J),NF(J),E(J),A(J),IZ(J),NTIPO(J)
235  FORMAT(3(5X,I5),3(5X,E14.4),3X,I5)
599  CONTINUE
      WRITE(3,285)
285  FORMAT(/,5X,'BARRA',5X,'FORCA AXIAL INICIAL')
      DO 788 J=1,NEL
        IF(NTIPO(J)-2)1444,1444,788
1444  CONTINUE
        WRITE(3,295)J,TI(J)
295  FORMAT(5X,I3,7X,E14.4)
788  CONTINUE
C
C LEITURA DOS ESFORCOS INICIAIS NOS PILARES
C
  DO 1588 J=1,NEL
    DO 1422 I=1,6
      F(I,J)=0.0
1422  CONTINUE
      IF(NTIPO(J)-2)1588,1588,1599
1599  CONTINUE
      READ(1,250)(F(K,J),K=1,6)
250  FORMAT(6F10.0)
1588  CONTINUE
C
C LEITURA DOS ELEMENTOS CONVERGENTES EM CADA NO
C
  WRITE(3,245)
245  FORMAT(/,5X,'NO',2X,'NUMERO DAS BARRAS CONVERGENTES AO NO')
  IF(KAB)622,611,622
611  CONTINUE
  IF(KSUST)622,633,622
633  CONTINUE
  IF(KCGN)622,644,622
644  CONTINUE
  J1=NN1/2
  DO 655 J=1,J1

```

```

      N(J)=3
      N(J1+J)=3
      ADJ(2*J-1,1)=J
      ADJ(2*J-1,2)=J+1
      ADJ(2*J-1,3)=2*NEL1+J
      ADJ(2*J,1)=NEL1+J
      ADJ(2*J,2)=NEL1+J+1
      ADJ(2*J,3)=2*NEL1+J
655  CONTINUE
      DO 666 J=1,NNI
        WRITE(3,265)J,(ADJ(J,I),I=1,3)
265  FORMAT(5X,I3,12X,3(I3,2X))
666  CONTINUE
      GO TO 677
622  CONTINUE
      DO 688 K=1,NNI
        READ(1,160)I,N(I)
160  FORMAT(2I5)
        NK=N(I)
        READ(1,170)I,(ADJ(I,J),J=1,NK)
170  FORMAT(10I5)
        WRITE(3,275)I,(ADJ(I,J),J=1,NK)
275  FORMAT(5X,I3,12X,5(I3,2X))
688  CONTINUE
677  CONTINUE
C
C LEITURA DO NUMERO DE NOS COM DESLOCAMENTOS IMPEDIDOS
C
C
C RD=1 DESLOCAMENTO LIVRE
C RD=0 DESLOCAMENTO IMPEDIDO
C
      DO 866 I=1,NCRD
        RD(I)=1
866  CONTINUE
      READ(1,240)NNDI
240  FORMAT(I5)
      DO 877 I=1,NNDI
        READ(1,260)J,RC(3*J-2),RD(3*J-1),RD(3*J)
260  FORMAT(4I5)
877  CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO INICIAL DOS ELEMENTOS E DOS COSSENO E SENOS DIRETORES
C
      DO 699 J=1,NEL
        J1=NI(J)
        J2=NF(J)
        XJ=X(J1)-X(J2)
        YJ=Y(J1)-Y(J2)
        LI(J)=DSQRT(XJ*XJ+YJ*YJ)
        COS(J)=CABS(XJ/LI(J))
        SEN(J)=CABS(YJ/LI(J))
699  CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO INDEFORMADO DOS ELEMENTOS

```



```

C
WRITE(3,345)
345  FORMAT(/,5X,'BARRA',5X,'COMPRIMENTO INICIAL')
      DO 855 J=1,NEL
          S0(J)=L1(J)/(1+TI(J)/E(J)/A(J))
          WRITE(3,435)J,S0(J)
435  FORMAT(5X,I3,7X,E14.6)
855  CONTINUE
C
C LEITURA DA DEFORMACAO ESPECIFICA DEVIDO A VARIACAO DE TEMPERATURA
C
WRITE(3,515)
515  FORMAT(/,5X,'BARRA',5X,'DEF TEMP')
      DO 1377 J=1,NEL
          READ(1,220)I,DEFT(I)
220  FORMAT(I5,F10.0)
          WRITE(3,505)I,DEFT(I)
505  FORMAT(5X,I3,5X,E14.4)
1377 CONTINUE
      DO 811 I=1,NND5
          PX(I)=0.0
          PY(I)=0.0
          PZ(I)=0.0
811  CONTINUE
      DO 1411 J=1,NEL
          P(J)=0.0
1411 CONTINUE
C
C LEITURA DO NUMERO DE CARREGAMENTOS A SEREM CONSIDERADOS
C
READ(1,180)NCA
180  FORMAT(I5)
WRITE(3,305)NCA
305  FORMAT(/,5X,'NUMERO DE CARREGAMENTOS',I3,/)
      DO 759 NCA1=1,NCA
          WRITE(3,315)NCA1
315  FORMAT(/,5X,'CARREGAMENTO',I3,/)
C
C LEITURA DO NUMERO DE NCS CARREGADOS
C
READ(1,190)NNC
190  FORMAT(I5)
      IF(NNC)822,833,822
822  CONTINUE
C
C LEITURA DAS CARGAS CONCENTRADAS APLICADAS EM CADA NO
C
WRITE(3,325)
325  FORMAT(5X,'NO',5X,'CARGA HORIZONTAL',5X,'CARGA VERTICAL',5X,'MOMENTO
      *TO APLICADO')
      DO 844 J=1,NNC
          READ(1,200)I,P1,P2,P3
200  FORMAT(I5,3F10.0)
          WRITE(3,335)I,P1,P2,P3
335  FORMAT(+X,I3,10X,E14.4,6X,E14.4,8X,E14.4)

```

```

      PX(I)=PX(I)+P1
      PY(I)=PY(I)+P2
      PZ(I)=PZ(I)+P3
844  CONTINUE
833  CONTINUE
C
C LEITURA DO NUMERO DE ELEMENTOS DE CAEC DE ACO COM CARREG. DISTRIBUIDO
C
      READ(1,310)NEC
310  FORMAT(15)
      IF(NEC)2011,2022,2011
2011 CONTINUE
C
C LEITURA DA RESULTANTE DA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA
C
      WRITE(3,805)
805  FORMAT(7,5X,'BARRA',5X,'RESULTANTE DA CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBU
      *IDA')
      DO 2033 I=1,NEC
      READ(1,320)J,P(J)
320  FORMAT(15,F10.0)
      WRITE(3,815)J,P(J)
815  FORMAT(5X,I3,7X,E14.4)
2033 CONTINUE
2022 CONTINUE
C
C LEITURA DO VALOR INICIAL DE T1
C
      READ(1,330)T11
330  FORMAT(F10.0)
      WRITE(3,825)T11
825  FORMAT(5X,'T11',E14.4)
      KONT=0
1433 CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO DEFORMADO DA CCECA DOS ELEMENTOS
C
      DO 888 J=1,NEL
      J1=N1(J)
      J2=N2(J)
      XJ=X(J1)-X(J2)
      YJ=Y(J1)-Y(J2)
      L(J)=DSQRT(XJ*XJ+YJ*YJ)
C
C CALCULO DOS COSENOS DIRETORES DOS ELEMENTOS
C
      COS(J)=(X(J2)-X(J1))/L(J)
      SEN(J)=(Y(J2)-Y(J1))/L(J)
      IF(MTIPO(J)-2)899,899,888
899  CONTINUE
C
C CALCULO DA DEFORMACAO ESPECIFICA DOS ELEMENTOS
C
      DEF(J)=(L(J)-S0(J))/S0(J)
C

```

C CALCULO DA FORÇA AXIAL NOS ELEMENTOS

```

C
      IF (P(J)-2) 2044, 2055, 2044
2044  CONTINUE
      IF (DEF(J)) 944, 933, 2066
2066  CONTINUE
      M1=((P(J)*COS(J)/(E(J)*A(J)))**2)*(1+DEF(J)-DEFT(J))*(10**9)/24
      M2=10**3*(DEF(J)-DEFT(J))
      T1=T11
      KONT1=0
2077  CONTINUE
      U=T1
      T1=T1-(T1-M1/T1**2-M2)/(1+2*M1/(T1*T1*T1))
      IF (DABS(T1-U).LE.0.0001) GO TO 2088
      KONT1=KONT1+1
      IF (KONT1.GE.5) GO TO 2099
      GO TO 2077
2099  CONTINUE
      WRITL(3,835)
835  FORMAT(/,5X,'NAC CONVERGE')
      GO TO 11
2088  CONTINUE
      T(J)=E(J)*A(J)/10**3*T1
      G(J)=E(J)*A(J)/50(J)*((1+(P(J)*COS(J)/T(J)**2/24))/(1+2*M1/T1**3)-T
* (J)/L(J))
      GO TO 888
2055  CONTINUE
      IF (DEF(J)) 944, 933, 944
933  CONTINUE
      T(J)=0.0
      G(J)=L(J)*A(J)/L(J)*(1+DEFT(J))
      GO TO 888
944  CONTINUE
      T(J)=E(J)*A(J)*(DEF(J)-DEFT(J))
      G(J)=L(J)*A(J)/L(J)*(1+DEFT(J))
888  CONTINUE

```

C
C CALCULO DO COMPRIMENTO DOS ELEMENTOS DE CABO DE AÇO
C E RESULTANTE DA CARGA DISTRIBUIDA NOS NOS

```

C
      DE 2111 I=1,NNCS
      R(1)=0.0
2111  CONTINUE
      DE 2122 J=1,NEL
      IF (P(J)-2) 2133, 2122, 2133
2133  CONTINUE
      S1(J)=L(J)*((1+((P(J)*C(S1(J))/T(J))**2)/24)
      J1=NI(J)
      J2=NF(J)
      U=P(J)/2*(1+L(J)*P(J)*SEN(J)/(6*S1(J)*T(J)))
      R(J2)=R(J2)+P(J)-U
      R(J1)=R(J1)+U
2122  CONTINUE

```

C
C CALCULO DA FORÇA DESEQUILIBRADA EM CADA NO

```

C
DO 955 I=1,NNRC
DQ(I)=0.0
955 CONTINUE
DO 1255 I=1,NNCS
DQX(I)=0.0
DQY(I)=0.0
DQZ(I)=0.0
1255 CONTINUE
DO 986 J=1,NNI
DQX(J)=PX(J)
DQY(J)=PY(J)+R(J)
DQZ(J)=PZ(J)
NK=N(J)
DO 977 K=1,NK
J1=AEJ(J,K)
J2=N1(J1)
J3=NF(J1)
IF(N1IPG(J1)-2)1555,1399,1566
1555 CONTINUE
IF(T(J1)-0.0)977,1399,1399
1399 CONTINUE
IF(J-J2)988,999,988
988 CONTINUE
DQX(J)=DQX(J)-T(J1)*(X(J3)-X(J2))/L(J1)
DQY(J)=DQY(J)-T(J1)*(Y(J3)-Y(J2))/L(J1)
GO TO 977
999 CONTINUE
DQX(J)=DQX(J)+T(J1)*(X(J3)-X(J2))/L(J1)
DQY(J)=DQY(J)+T(J1)*(Y(J3)-Y(J2))/L(J1)
GO TO 977
1566 CONTINUE
IF(J-J2)1577,1611,1577
1577 CONTINUE
DQX(J)=DQX(J)-F(4,J1)
DQY(J)=DQY(J)-F(5,J1)
DQZ(J)=DQZ(J)-F(6,J1)
GO TO 977
1611 CONTINUE
DQX(J)=DQX(J)-F(1,J1)
DQY(J)=DQY(J)-F(2,J1)
DQZ(J)=DQZ(J)-F(3,J1)
977 CONTINUE
956 CONTINUE
DO 1111 J=1,NNI
IF(DABS(DQX(J))+DABS(DQY(J))-0.01)1111,1111,1133
1111 CONTINUE
DO 1122 J=1,NNI
IF(DABS(DQZ(J))-0.01)1122,1122,1133
1122 CONTINUE
GO TO 1144
1133 CONTINUE
DO 1155 I=1,NNCS
DQ(3*I-2)=DQX(I)
DQ(3*I-1)=DQY(I)

```

A.10

```

          DQ(3*I)=DQZ(I)
1155  CONTINUE
C-----
C CALCULO DA MATRIZ DE RIGIDEZ DOS ELEMENTOS
C-----
          DO 1177 I=1,NCRD
          DO 1177 J=1,NCRD
          RIG(I,J)=0.0
1177  CONTINUE
          DO 1199 J=1,NEL
          AUX1=L(J)
          AUX2=A(J)
          AUX3=E(J)
          AUX4=CCS(J)
          AUX5=SEN(J)
          AUX6=IZ(J)
          AUX7=T(J)
          AUX8=G(J)
          IF(NI1PC(J)-2)1333,922,1344
1333  CONTINUE
          IF(AUX7)1199,922,922
922   CONTINUE
          CALL RIGB(AUX1,AUX4,AUX5,AUX7,AUX8,RE)
          GO TO 1211
1344  CONTINUE
          CALL RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
1211  CONTINUE
C-----
C MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA ESTRUTURA
C-----
          IW(1)=3*NI(J)-2
          IW(2)=J1+1
          IW(3)=J2+1
          JW(1)=3*NF(J)-2
          JW(2)=K1+1
          JW(3)=K2+1
          DO 1388 I1=1,3
          DO 1388 I2=1,3
          RIG(IW(I1),IW(I2))=RIG(IW(I1),IW(I2))+RE(I1,I2)
          RIG(IW(I1),JW(I2))=RIG(IW(I1),JW(I2))+RE(I1,I2+3)
          RIG(JW(I1),IW(I2))=RIG(JW(I1),IW(I2))+RE(I1+3,I2)
          RIG(JW(I1),JW(I2))=RIG(JW(I1),JW(I2))+RE(I1+3,I2+3)
1388  CONTINUE
1199  CONTINUE
          DO 1222 I=1,NCRD
          IF(RIG(I,I)-0.0)1233,1244,1233
1233  CONTINUE
          IF(RI(I)-0)1222,1244,1222
1244  CONTINUE
          DO 1266 J=1,NCRD
          RIG(I,J)=0.0
          RIG(J,I)=0.0
          RIG(I,I)=1.0
1266  CONTINUE
1222  CONTINUE

```

```

C-----
C OBTENGA LA MATRIZ TRIANGULAR SUPERIOR
C-----
      CALL DECOM(RIG,NCRE)
C-----
C CALCULE LAS INCOGNITAS (DESLOCAMENTOS)
C-----
      CALL CHOLE(RIG,DQ,NCRD)
      DO 1322 I=1,NNCS
      DX(I)=DX(I)+DQ(3*I-2)
      DY(I)=DY(I)+DQ(3*I-1)
      DZ(I)=DZ(I)+DQ(3*I)
1322  CONTINUE
C-----
C CALCULE LAS NOVAS COORDENADAS DEL NCS
C-----
      DO 1311 I=1,NNCS
      X(I)=X(I)+DQ(3*I-2)
      Y(I)=Y(I)+DQ(3*I-1)
      Z(I)=Z(I)+DQ(3*I)
1311  CONTINUE
C-----
C CALCULO DE LOS ESFUERZOS NCS NCS DE LOS PILARES
C-----
      DO 1277 J=1,NE1
      IF(NTIPO(J)-2)1277,1277,1288
1288  CONTINUE
      AUX1=L(J)
      AUX2=A(J)
      AUX3=E(J)
      AUX4=CCS(J)
      AUX5=SEN(J)
      AUX6=LZ(J)
      CALL RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
      N1=NI(J)
      N2=NF(J)
      D(1)=DQ(3*N1-2)
      D(2)=DQ(3*N1-1)
      D(3)=DQ(3*N1)
      D(4)=DQ(3*N2-2)
      D(5)=DQ(3*N2-1)
      D(6)=DQ(3*N2)
      DO 1299 I=1,6
      F(1,J)=F(1,J)+RE(1,I)*D(I)
      F(2,J)=F(2,J)+RE(2,I)*D(I)
      F(3,J)=F(3,J)+RE(3,I)*D(I)
      F(4,J)=F(4,J)+RE(4,I)*D(I)
      F(5,J)=F(5,J)+RE(5,I)*D(I)
      F(6,J)=F(6,J)+RE(6,I)*D(I)
1299  CONTINUE
1277  CONTINUE
      KCNT=KCNT+1
      IF(KCNT-10)1433,1433,1144
1144  CONTINUE
      WRITE(3,365)

```

```

365  FORMAT(///,5X,'POSICAO DE EQUILIBRIO PARA O CARREGAMENTO',//)
      WRITE(3,375)
375  FORMAT(5X,'NO',7X,'COORDENADA X',7X,'COORDENADA Y',7X,'COORDENADA
      #Z')
      DO 1488 I=1,NNCS
      WRITE(3,385) I,X(I),Y(I),Z(I)
385  FORMAT(5X,I2,3(7X,E14.7))
1488  CONTINUE
      WRITE(3,495)
495  FORMAT(//,5X,'NC',5X,'DESLOC HORIZ',5X,'DESLOC VERT',5X,'ROTAÇÃO')
      DO 1355 I=1,NNCS
      WRITE(3,585) I,DX(I),DY(I),DZ(I)
585  FORMAT(5X,I2,5X,E12.4,5X,E10.4,3X,E10.4)
1355  CONTINUE
      WRITE(3,395)
395  FORMAT(///,5X,'ESFORÇOS FINAIS NAS BARRAS',//)
      WRITE(3,405)
405  FORMAT(5X,'BARRA',5X,'FORÇA FINAL')
      DO 1499 J=1,NEL
      IF(NTIPO(J)-2) 1455,1455,1499
1455  CONTINUE
      WRITE(3,415) J,T(J)
415  FORMAT(5X,I3,5X,E14.7)
1499  CONTINUE
      WRITE(3,445)
445  FORMAT(///,5X,'ESFORÇOS FINAIS NOS PILARES',//)
      DO 1466 J=1,NEL
      IF(NTIPO(J)-2) 1466,1466,1477
1477  CONTINUE
      WRITE(3,465) J
465  FORMAT(5X,'PILAR',I3)
      WRITE(3,475) NI(J),F(2,J),F(1,J),F(3,J)
475  FORMAT(5X,'NI=',I3,5X,'N=',E14.4,5X,'Q=',E14.4,5X,'M=',E14.4)
      WRITE(3,485) NF(J),F(5,J),F(4,J),F(6,J)
485  FORMAT(5X,'NF=',I3,5X,'N=',E14.4,5X,'Q=',E14.4,5X,'M=',E14.4)
1466  CONTINUE
      WRITE(3,425) KONT
425  FORMAT(//,5X,'NUMERO DE ITERACOES',I3)
799  CONTINUE
11   CONTINUE
      CALL EXIT
      END

```

```

      SUBROUTINE RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
C-----
C  CALCULO DA MATRIZ DE RIGIDEZ DE UMA VIGA
C  (PREVENDO-SE A TRANSFORMAÇÃO DE SISTEMA DE COORDENADAS
C   LOCAL PARA GLOBAL)
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,L,C-Z)
      DIMENSION RE(6,6),RV(6,6),TC(6,6),AUX(6,6)
      DO 11 I=1,6
      DO 11 J=1,6
      RV(I,J)=0.0
11    CONTINUE
      RV(1,1)=AUX3*AUX2/AUX1
      RV(2,2)=12*AUX6*AUX3/(AUX1**3)
      RV(3,3)=4*AUX6*AUX3/AUX1
      RV(4,4)=RV(1,1)
      RV(5,5)=RV(2,2)
      RV(6,6)=RV(3,3)
      RV(1,4)=-RV(1,1)
      RV(4,1)=RV(1,4)
      RV(2,3)=6*AUX6*AUX3/(AUX1**2)
      RV(3,2)=RV(2,3)
      RV(2,6)=RV(3,2)
      RV(6,2)=RV(2,6)
      RV(3,5)=-RV(2,3)
      RV(5,3)=RV(3,5)
      RV(5,6)=RV(3,5)
      RV(6,5)=RV(5,6)
      RV(2,5)=-RV(2,2)
      RV(5,2)=RV(2,5)
      RV(3,6)=2*AUX6*AUX3/AUX1
      RV(6,3)=RV(3,6)
      DO 22 I=1,6
      DO 22 J=1,6
      TC(I,J)=0.0
22    CONTINUE
      TC(1,1)=AUX4
      TC(2,2)=TC(1,1)
      TC(4,4)=TC(1,1)
      TC(5,5)=TC(1,1)
      TC(3,3)=1
      TC(6,6)=1
      TC(1,2)=AUX5
      TC(4,5)=TC(1,2)
      TC(2,1)=-TC(1,2)
      TC(5,4)=TC(2,1)
      DO 33 I=1,6
      DO 33 J=1,6
      AUX(I,J)=0.0
      DO 33 K=1,6
      AUX(I,J)=AUX(I,J)+TC(K,1)*RV(K,J)
33    CONTINUE
      DO 44 I=1,6
      DO 44 J=1,6
      RE(I,J)=0.0

```



```

      DO 44 K=1,6
      RE(I,J)=RE(I,J)+AUX(I,K)*TC(K,J)
44    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE RIG2(AUX1,AUX4,AUX5,AUX7,AUX8,RE)
C-----
C  CALCULO DA MATRIZ DE RIGIDEZ DE UMA BARRA
C  (NO SISTEMA DE COORD GLOBAL)
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,L,C-Z)
      DIMENSION RE(6,6)
      DO 11 I=1,6
      DO 11 J=1,6
      RE(I,J)=0.0
11    CONTINUE
      RE(1,1)=AUX8*(AUX4**2)+(AUX7/AUX1)
      RE(4,4)=RE(1,1)
      RE(1,4)=-RE(1,1)
      RE(4,1)=RE(1,4)
      RE(2,2)=AUX8*(AUX5**2)+(AUX7/AUX1)
      RE(5,5)=RE(2,2)
      RE(2,5)=-RE(2,2)
      RE(5,2)=RE(2,5)
      RE(1,2)=AUX8*AUX4*AUX5
      RE(2,1)=RE(1,2)
      RE(4,5)=RE(1,2)
      RE(5,4)=RE(4,5)
      RE(1,5)=-RE(1,2)
      RE(5,1)=RE(1,5)
      RE(2,4)=-RE(1,2)
      RE(4,2)=RE(2,4)
      RETURN
      END

```

APÊNDICE B

PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN PARA A ANÁLISE
DINÂMICA DE CABOS-TRELIÇA

B.1

```

C-----
C ANALISE DE CABOS-TRELLICA POR PROCESSO DISCRETO
C ANALISE DINAMICA
C CALCULO DOS DESLOCAMENTOS DOS NOS E ESFORÇOS NOS ELEMENTOS
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-F,L,G-Z)
      REAL*8 IZ(120),MM(297,297),MMI(6,6),MMM(297,297)
      INTEGER ADJ(99,6),FD(297)
      DIMENSION X(99),Y(99),Z(99),E(120),A(120),MTIPO(120),RO(120),
      *NI(120),NF(120),N(99),L1(120),L(120),COS(120),SEN(120),SD(120),
      *DEFT(120),DEF(120),GD(297),T(120),ACEL(99),VEL(99),DESL(99),
      *TI(120),RIG(297,297),RE(6,6),D(6),F(6,120),GR(99)
      OPEN(UNIT=1,STATUS='OLD',FILE='VENTO',ACCESS='SEQUENTIAL',FORM='FO
      *RMATTED')
      WRITE(3,5)
5      FORMAT(5X,'CALCULO DE CABOS-TRELLICA POR PROCESSO DISCRETO SOB ACAD
      * DINAMICA')
      WRITE(3,15)
15     FORMAT(5X,63(' '),//)
C
C LEITURA DO NUMERO DE ESTRUTURAS A SEREM CALCULADAS
C
      READ(1,10)NES
10     FORMAT(I5)
      WRITE(3,25)NES
25     FORMAT(5X,'NUMERO DE ESTRUTURAS CALCULADAS',I3,//)
      DO 11 NES1=1,NES
      WRITE(3,35)NES1
35     FORMAT(5X,'ESTRUTURA NUMERO',I3,/)
C
C LEITURA DAS CARACTERISTICAS DA ESTRUTURA NO ESTADO INICIAL
C (COM PRETENSÃO E SOB CARREGAMENTO ESTÁTICO)
C
      READ(1,20)VL,F1,F2,E1,F2,D1,D2
20     FORMAT(7F8.0)
      WRITE(3,45)
45     FORMAT(5X,'CARACTERISTICAS DA ESTRUTURA CALCULADA',//)
      WRITE(3,65)VL
65     FORMAT(5X,'VAL LIVRE',F8.2,/)
      WRITE(3,75)F1
75     FORMAT(5X,'FLECHA DO CABO PORTANTE',F8.2)
      WRITE(3,85)F2
85     FORMAT(5X,'FLECHA DO CABO TENSOR',F8.2,/)
      WRITE(3,95)E1
95     FORMAT(5X,'DESNIVEL ENTRE ARRANQUES DO CABO PORTANTE',F8.2)
      WRITE(3,105)E2
105    FORMAT(5X,'DESNIVEL ENTRE ARRANQUES DO CABO TENSOR',F8.2,/)
      WRITE(3,115)D1,D2
115   FORMAT(5X,'DISTANCIA VERTICAL ENTRE OS ARRANQUES DOS CABOS A ESQUE
      *RDA E A DIREITA',2F8.2,//)
C
C LEITURA DO NUMERO DE NOS, DE ELEMENTOS E DE NOS INTERNOS
C
      READ(1,30)NNOS,NEL,NNI
30     FORMAT(3I5)

```

B.2

```

        WRITE(3,165)NNCS,NFL,NM1
165   FORMAT(5X,'NUMERO DE NCS',I5,/,5X,'NUMERO DE ELEMENTOS',I5,/,5X,'N
        *UMERO DE NOS INTERNOS',I5,/)
C   NCRD E C NUMERO DE COORDENADAS
        NCRD=3*NNCS
C
C   LEITURA DO NUMERO DE ELEMENTOS NCS CABOS PORTANTE E TENSOR
C
        READ(1,40)NEL1,NEL2
40    FORMAT(2I5)
        WRITE(3,175)NEL1,NEL2
175   FORMAT(5X,'NUMERO DE ELEMENTOS NCS CABOS PORTANTE E TENSOR',2I5,//
        *)
C
C   LEITURA DE TIPO DE CABO
C   KAB=0 (CABO-TRELICA COM HASTES VERTICAIS)
C   KAB=1 (CABO-TRELICA COM DIAGONAIS)
C
        READ(1,50)KAB
50    FORMAT(I5)
C
C   LEITURA DO TIPO DE ESTRUTURA DE SUSTENTACAO
C   KSUST=0 (ESTRUTURA INDESLOCAVEL)
C   KSUST=8 (ESTRUTURA ATIRANTADA)
C   KSUST=4 (ESTRUTURA COM PILARES ENGASTADOS)
C
        READ(1,60)KSUST
60    FORMAT(I5)
C
C   LEITURA DO TIPO DE CONEXAO CENTRAL
C   KCCN=0 (CABOS PORTANTE E TENSOR NAO CONECTADOS)
C   KCCN=1 (CABOS PORTANTE E TENSOR CONECTADOS)
C
        READ(1,70)KCCN
70    FORMAT(I5)
        DO 1166 I=1,NNCS
            X(I)=0.0
            Y(I)=0.0
            Z(I)=0.0
1166   CONTINUE
        IF(KAB)33,22,33
22     CONTINUE
C
C   LEITURA DO ESPACAMENTO DOS TIRANTES (CONSTANTE)
C
        READ(1,80)S
80    FORMAT(F10.0)
        WRITE(3,195)S
195   FORMAT(5X,'ESPACAMENTO',F8.2,/)
C
C   GERACAO DAS COORDENADAS DOS NOS INTERNOS
C
        IF(KSUST)33,44,33
44    CONTINUE
        IF(KCCN)77,56,77

```

```

66  CONTINUE
    K1=NNI/2
    DO 86 K=1,K1
    X(2*K-1)=K*S
    Y(2*K-1)=-4*F1*X(2*K-1)**2/VL**2+E1*X(2*K-1)/VL+4*F1*X(2*K-1)/VL
    X(2*K)=K*S
    Y(2*K)=4*F2*X(2*K)**2/VL**2+E2*X(2*K)/VL-4*F2*X(2*K)/VL+D1
86  CONTINUE
    GO TO 99
77  CONTINUE
    K1=NEI1-1
    DO 111 K=1,K1
    X(2*K-1)=K*S
    Y(2*K-1)=-4*F1*X(2*K-1)**2/VL**2+E1*X(2*K-1)/VL+4*F1*X(2*K-1)/VL
111 CONTINUE
    K2=NEI2-2
    K3=NEI2/2
    K4=K3-1
    K5=K3+1
    DO 122 K=1,K4
    X(2*K)=K*S
122 CONTINUE
    X(2*K3)=X(2*K4)+2*S
    DO 133 K=K5,K2
    X(2*K)=X(2*K-2)+S
133 CONTINUE
    DO 144 K=1,K2
    Y(2*K)=4*F2*X(2*K)**2/VL**2+E2*X(2*K)/VL-4*F2*X(2*K)/VL+D1
144 CONTINUE
99  CONTINUE
C
C LEITURA DAS COORDENADAS DOS NÓS DE APIC
C
    NNIA=NNI+1
    DO 388 I=NNIA,NNDS
    READ(1,110)K,X(K),Y(K)
110  FORMAT(15,2F10.0)
388  CONTINUE
    GO TO 55
33  CONTINUE
C
C LEITURA DAS COORDENADAS DOS NLS
C
    DO 3888 I=1,NNCS
    READ(1,110)K,X(K),Y(K)
3888 CONTINUE
55  CONTINUE
    WRITE(3,205)
205  FORMAT(5X,'NUMERO DO NO',5X,'COORDENADA X',10X,'COORDENADA Y',/)
    DO 399 K=1,NNDS
    WRITE(3,215)K,X(K),Y(K)
215  FORMAT(10X,I3,10X,E12.4,10X,L12.4)
399  CONTINUE
C
C LEITURA DAS CARACTERISTICAS DOS ELEMENTOS

```

```

C A (SECAC TRANSVERSAL DOS ELEMENTOS)
C E (MODULO DE ELASTICIDADE DOS ELEMENTOS)
C IZ (MOMENTO DE INERCIA DOS PILARES)
C RC (DENSIDADE DE MASSA DO MATERIAL DOS ELEMENTOS)
C NTIPO = 1 (ELEMENTO DE CABO DE ACO)
C NTIPO = 2 (ELEMENTO COM RESIST. A ESFORÇOS DE TRACAO E COMPRESSAO)
C NTIPO = 3 (ELEMENTO COM RESIST. A ESFORÇOS DE FLEXAO)
C TI (FORÇA AXIAL INICIAL)
C
  DO 588 K=1,NEL
    READ(1,140)I,NI(I),NF(I),E(I),A(I),IZ(I),NTIPO(I),TI(I),RC(I)
140  FORMAT(3I5,3F10.0,15,2F10.0)
588  CONTINUE
    WRITE(3,225)
225  FORMAT(//,5X,'BARRA',2X,'NO INICIAL',2X,'NO FINAL',6X,'MODULO ELAS
    ',6X,'SECAC TRANSV',6X,'MOM INERCIA',6X,'TIPO',6X,'DENS MASSA')
    DO 599 J=1,NEL
      WRITE(3,235)J,NI(J),NF(J),E(J),A(J),IZ(J),NTIPO(J),RC(J)
235  FORMAT(3(5X,15),3(5X,E14.4),3X,15,3X,E14.6)
599  CONTINUE
      WRITE(3,285)
285  FORMAT(//,5X,'BARRA',5X,'FORÇA AXIAL INICIAL')
      DO 788 I=1,NEL
        IF(NTIPO(I)-2)1444,1444,788
1444  CONTINUE
        WRITE(3,295)I, TI(I)
295  FORMAT(5X,13,7X,E14.4)
788  CONTINUE
C
C LEITURA DOS ESFORÇOS INICIAIS NOS PILARES
C
  DO 1588 J=1,NEL
    DO 1422 I=1,6
      F(I,J)=0.0
1422  CONTINUE
      IF(NTIPO(J)-2)1588,1588,1599
1599  CONTINUE
      RLAC(1,250)(F(K,J),K=1,6)
250  FORMAT(6F10.0)
1588  CONTINUE
C
C LEITURA DAS BARRAS CONVERGENTES EM CADA NO
C
  WRITE(3,245)
245  FORMAT(//,5X,'NO',2X,'NUMERO DAS BARRAS CONVERGENTES AO NO')
  DO 688 K=1,NNDS
    READ(1,160)I,N(I)
160  FORMAT(2I5)
    NK=N(I)
    READ(1,170)I,(ADJ(I,J),J=1,NK)
170  FORMAT(10I5)
    WRITE(3,275)I,(ADJ(I,J),J=1,NK)
275  FORMAT(5X,13,12X,5(13,2X))
688  CONTINUE
C

```

```

C LEITURA DO NUMERO DE NCS COM DESLOCAMENTOS IMPEDIDOS
C
C
C RD=1 DESLOCAMENTO LIVRE
C RD=0 DESLOCAMENTO IMPEDIDO
C
      DO 866 I=1,NCRD
      RD(I)=1
866   CONTINUE
      READ(1,240)NNDI
240   FORMAT(I5)
      DO 877 I=1,NNDI
      READ(1,260)J,RC(3*I-2),RC(3*I-1),RC(3*I)
260   FORMAT(4I5)
877   CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO INICIAL DOS ELEMENTOS E DOS COSSENO E DIRETORRES
C
      DO 699 J=1,NEL
      J1=NI(J)
      J2=NF(J)
      XJ=X(J1)-X(J2)
      YJ=Y(J1)-Y(J2)
      LI(J)=ESQRT(XJ*XJ+YJ*YJ)
      COS(J)=EABS(XJ/LI(J))
      SEN(J)=EABS(YJ/LI(J))
699   CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO INDEFORMADO DOS ELEMENTOS
C
      WRITE(3,345)
345   FORMAT(/,5X,'BARRA',5X,'COMPRIMENTO INICIAL')
      DO 855 J=1,NEL
      SO(J)=LI(J)/(1+TI(J)/E(J)/A(J))
      WRITE(3,435)J,SO(J)
435   FORMAT(5X,I3,7X,E14.4)
855   CONTINUE
C
C LEITURA DA DEFORMACAO ESPECIFICA DEVIDO A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA
C
      WRITE(3,515)
515   FORMAT(/,5X,'BARRA',5X,'DEF TEMP')
      DO 1377 J=1,NEL
      READ(1,220)I,DEFT(I)
220   FORMAT(15,F10.0)
      WRITE(3,505)I,DEFT(I)
505   FORMAT(5X,I3,5X,E14.4)
1377  CONTINUE
      DO 1699 I=1,NCRD
      QD(I)=0.0
      ACEL(I)=0.0
      VEL(I)=0.0
      DESL(I)=0.0
1699  CONTINUE
C

```

```

C LEITURA DO INTERVALO DE TEMPO PARA CARGA DINAMICA
C
      REAL(1,350)DELT
350   FORMAT(F10.0)
C
C LEITURA DA CONSTANTE MULTIPLICADORA PARA A MATRIZ DE AMORTECIMENTO
C
      READ(1,360)AMORT
360   FORMAT(F10.0)
C
C LEITURA DO PERIODO DE ATUACAO DA CARGA DINAMICA
C
      READ(1,180)PERIOD
180   FORMAT(F10.0)
      WRITE(3,305)PERIOD
305   FORMAT(//,5X,' PERIODO DE ATUACAO DA CARGA DINAMICA',E14.4,/)
      NCAF=PERIOD/DELT
      TEMPC=0.0
C-----
C CALCULO DA MATRIZ DE MASSA DOS ELEMENTOS
C-----
      DO 1544 I=1,NCRD
      DO 1544 J=1,NCRD
      MM(I,J)=0.0
1544  CONTINUE
      DO 1622 J=1,NEL1
      AUX1=S0(J)
      AUX2=A(J)
      AUX3=R0(J)
      NAUX=NTIPC(J)
      CALL MMASSA(AUX1,AUX2,AUX3,NAUX,MMI)
C-----
C MONTAGEM DA MATRIZ DE MASSA DA ESTRUTURA
C-----
      J1=3*N1(J)-2
      J2=J1+1
      J3=J2+1
      K1=3*N2(J)-2
      K2=K1+1
      K3=K2+1
      MM(J1,J1)=MM(J1,J1)+MMI(1,1)
      MM(J1,J2)=MM(J1,J2)+MMI(1,2)
      MM(J1,J3)=MM(J1,J3)+MMI(1,3)
      MM(J1,K1)=MM(J1,K1)+MMI(1,4)
      MM(J1,K2)=MM(J1,K2)+MMI(1,5)
      MM(J1,K3)=MM(J1,K3)+MMI(1,6)
      MM(J2,J1)=MM(J2,J1)+MMI(2,1)
      MM(J2,J2)=MM(J2,J2)+MMI(2,2)
      MM(J2,J3)=MM(J2,J3)+MMI(2,3)
      MM(J2,K1)=MM(J2,K1)+MMI(2,4)
      MM(J2,K2)=MM(J2,K2)+MMI(2,5)
      MM(J2,K3)=MM(J2,K3)+MMI(2,6)
      MM(J3,J1)=MM(J3,J1)+MMI(3,1)
      MM(J3,J2)=MM(J3,J2)+MMI(3,2)
      MM(J3,J3)=MM(J3,J3)+MMI(3,3)

```



```

MM(J3,K1)=MM(J3,K1)+MMI(3,4)
MM(J3,K2)=MM(J3,K2)+MMI(3,5)
MM(J3,K3)=MM(J3,K3)+MMI(3,6)
MM(K1,J1)=MM(K1,J1)+MMI(4,1)
MM(K1,J2)=MM(K1,J2)+MMI(4,2)
MM(K1,J3)=MM(K1,J3)+MMI(4,3)
MM(K1,K1)=MM(K1,K1)+MMI(4,4)
MM(K1,K2)=MM(K1,K2)+MMI(4,5)
MM(K1,K3)=MM(K1,K3)+MMI(4,6)
MM(K2,J1)=MM(K2,J1)+MMI(5,1)
MM(K2,J2)=MM(K2,J2)+MMI(5,2)
MM(K2,J3)=MM(K2,J3)+MMI(5,3)
MM(K2,K1)=MM(K2,K1)+MMI(5,4)
MM(K2,K2)=MM(K2,K2)+MMI(5,5)
MM(K2,K3)=MM(K2,K3)+MMI(5,6)
MM(K3,J1)=MM(K3,J1)+MMI(6,1)
MM(K3,J2)=MM(K3,J2)+MMI(6,2)
MM(K3,J3)=MM(K3,J3)+MMI(6,3)
MM(K3,K1)=MM(K3,K1)+MMI(6,4)
MM(K3,K2)=MM(K3,K2)+MMI(6,5)
MM(K3,K3)=MM(K3,K3)+MMI(6,6)
1622 CONTINUE
C
C LEITURA DA ACCELERACAO DA GRAVIDADE
C
      READ(1,230)G
230   FORMAT(F10.0)
      DO 799 NCA1=1,NCAR
      WRITE(3,315)NCA1
315   FORMAT(/,5X,'CARREGAMENTO',I3,/)
      TEMPC=NCA1*DELT
C
C CALCULO DA CARGA DINAMICA
C
      AC=0.1*G*DSIN(3.14*TEMPC)
      WRITE(3,19)TEMPC,AC
19    FORMAT(5X,'TEMPC=',E14.4,5X,'ACEL=',E14.4)
      DO 1688 I=1,NNCS
      J=3*I-1
      IAUJ=RU(J)
      IF(IAUJ-0)1522,1555,1522
1555  CONTINUE
      UD(J)=0.0
      GO TO 1688
1522  CONTINUE
      UD(J)=MM(J,J)*AC
1688  CONTINUE
      KUNT=0
1433  CONTINUE
C
C CALCULO DO COMPRIMENTO DEFORMADO DA CERDA DOS ELEMENTOS
C
      DO 888 J=1,NEL
      J1=NI(J)
      J2=NF(J)

```

```

      XJ=X(J1)-X(J2)
      YJ=Y(J1)-Y(J2)
      L(J)=DSQRT(XJ*XJ+YJ*YJ)
C
C  CALCULE OS COSSENO E DIRETORAS DOS ELEMENTOS
C
      COS(J)=(X(J2)-X(J1))/L(J)
      SEN(J)=(Y(J2)-Y(J1))/L(J)
      IF(NTIPC(J)-2) 899,899,888
899  CONTINUE
C
C  CALCULE DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DOS ELEMENTOS
C
      DLF(J)=(L(J)-SO(J))/SO(J)
C
C  CALCULE DA FORÇA DAS BARRAS
C
      IF(DLF(J))944,933,944
933  CONTINUE
      T(J)=C.0
      GO TO 838
944  CONTINUE
      T(J)=E(J)*A(J)*(DLF(J)-DEFT(J))
888  CONTINUE
C----
C  CALCULE DA MATRIZ DE RIGIDEZ DOS ELEMENTOS
C----
      DO 1177 I=1,NCRD
      DO 1177 J=1,NCRD
      RIG(I,J)=0.0
1177  CONTINUE
      DO 1199 J=1,NEL
      AUX1=L(J)
      AUX2=A(J)
      AUX3=E(J)
      AUX4=COS(J)
      AUX5=SEN(J)
      AUX6=IZ(J)
      AUX7=T(J)
      IF(NTIPC(J)-2) 1333,922,1344
1333  CONTINUE
      IF(AUX7)1199,922,922
922  CONTINUE
      CALL RIGB(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX7,RE)
      GO TO 1211
1344  CONTINUE
      CALL RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
1211  CONTINUE
C----
C  MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA ESTRUTURA
C----
      J1=3*NI(J)-2
      J2=J1+1
      J3=J2+1
      K1=3*NF(J)-2

```

```

K2=K1+1
K3=K2+1
RIG(J1,J1)=RIG(J1,J1)+RE(1,1)
RIG(J1,J2)=RIG(J1,J2)+RE(1,2)
RIG(J1,J3)=RIG(J1,J3)+RE(1,3)
RIG(J1,K1)=RIG(J1,K1)+RE(1,4)
RIG(J1,K2)=RIG(J1,K2)+RE(1,5)
RIG(J1,K3)=RIG(J1,K3)+RE(1,6)
RIG(J2,J1)=RIG(J2,J1)+RE(2,1)
RIG(J2,J2)=RIG(J2,J2)+RE(2,2)
RIG(J2,J3)=RIG(J2,J3)+RE(2,3)
RIG(J2,K1)=RIG(J2,K1)+RE(2,4)
RIG(J2,K2)=RIG(J2,K2)+RE(2,5)
RIG(J2,K3)=RIG(J2,K3)+RE(2,6)
RIG(J3,J1)=RIG(J3,J1)+RE(3,1)
RIG(J3,J2)=RIG(J3,J2)+RE(3,2)
RIG(J3,J3)=RIG(J3,J3)+RE(3,3)
RIG(J3,K1)=RIG(J3,K1)+RE(3,4)
RIG(J3,K2)=RIG(J3,K2)+RE(3,5)
RIG(J3,K3)=RIG(J3,K3)+RE(3,6)
RIG(K1,J1)=RIG(K1,J1)+RE(4,1)
RIG(K1,J2)=RIG(K1,J2)+RE(4,2)
RIG(K1,J3)=RIG(K1,J3)+RE(4,3)
RIG(K1,K1)=RIG(K1,K1)+RE(4,4)
RIG(K1,K2)=RIG(K1,K2)+RE(4,5)
RIG(K1,K3)=RIG(K1,K3)+RE(4,6)
RIG(K2,J1)=RIG(K2,J1)+RE(5,1)
RIG(K2,J2)=RIG(K2,J2)+RE(5,2)
RIG(K2,J3)=RIG(K2,J3)+RE(5,3)
RIG(K2,K1)=RIG(K2,K1)+RE(5,4)
RIG(K2,K2)=RIG(K2,K2)+RE(5,5)
RIG(K2,K3)=RIG(K2,K3)+RE(5,6)
RIG(K3,J1)=RIG(K3,J1)+RE(6,1)
RIG(K3,J2)=RIG(K3,J2)+RE(6,2)
RIG(K3,J3)=RIG(K3,J3)+RE(6,3)
RIG(K3,K1)=RIG(K3,K1)+RE(6,4)
RIG(K3,K2)=RIG(K3,K2)+RE(6,5)
RIG(K3,K3)=RIG(K3,K3)+RE(6,6)
1199 CONTINUE
C
C CALCULO DA FORÇA DESEQUILIBRADA EM CADA NO
C
DO 1355 I=1,NCRD
QR(I)=QR(I)
DO 1355 J=1,NCRD
QR(I)=QR(I)-(MM(I,J)*ACCL(J)+AMORT*MM(I,J)*VEL(J)+RIG(I,J)*DESL(J)
*)
1355 CONTINUE
C
C TESTE DA PRECISAO
C
DO 1366 I=1,NCRD
XYZ=QR(I)
IF(DABS(XYZ).GT.0.01)GL GO 1511
1366 CONTINUE

```

```

      GC TC 1144
1511  CONTINUE
C-----
C CALCULO LA MATRIZ DE MASSA MODIFICADA
C-----
      DO 1944 I=1,NCRD
      DO 1944 J=1,NCRD
      MMM(I,J)=0.0
1944  CONTINUE
      DO 1633 I=1,NCRD
      DO 1633 K=1,NCRD
      MMM(I,K)=MM(I,K)+(AMORT*DELT)/2*MM(I,K)+(DELT**2)/6*RIG(I,K)
1633  CONTINUE
      DO 1999 I=1,NCRD
      AUX=MMM(I,1)
      IF(AUX-0.0)1999,1244,1999
1244  CONTINUE
      DO 1399 J=1,NCRD
      MMM(I,J)=0.0
      MMM(J,I)=0.0
      MMM(I,I)=1.0
1399  CONTINUE
1999  CONTINUE
      DO 966 I=1,NCRD
      NAUX=RC(I)
      IF(NAUX-C)966,977,966
977   CONTINUE
      DO 988 J=1,NCRD
      MMM(I,J)=0.0
      MMM(J,I)=0.0
      MMM(I,I)=1.0
988   CONTINUE
966   CONTINUE
C-----
C CALCULO LA MATRIZ DE CARGA MODIFICADA
C-----
      DO 1644 I=1,NCRD
      DO 1644 K=1,NCRD
      IAUX=RC(I)
      IF(IAUX-0)1777,1888,1777
1888  CONTINUE
      QR(I)=0.0
      GO TO 1644
1777  CONTINUE
      QR(I)=QR(I)-AMORT*DELT*MM(I,K)*ACEL(K)-RIG(I,K)*(DELT*VEL(K)+((DELT
      *T**2)/2)*ACEL(K))
1644  CONTINUE
      CALL DECOM(MMM,NCRD)
      CALL CHCLE(MMM,QR,NCRD)
C-----
C CALCULO DAS NOVAS ACELERACOES DOS NCS
C-----
      DO 1655 I=1,NCRD
      ACEL(I)=ACEL(I)+QR(I)
1655  CONTINUE

```

B.11

```

C----
C CALCULO LAS NOVAS VELOCIDADES DOS NUS
C----
      DO 1666 I=1,NCRD
      VEL(I)=VEL(I)+ACEL(I)*DELT+QR(I)*DELT/2
1666  CONTINUE
C----
C CALCULO LOS NOVOS DESLOCAMENTOS
C----
      DO 1677 I=1,NCRD
      DESL(I)=DESL(I)+VEL(I)*DELT+ACEL(I)*(DELT**2)/2+QR(I)*(DELT**2)/6
1677  CONTINUE
C----
C CALCULO LAS NOVAS COORDENADAS DOS NCS
C----
      DO 1311 I=1,NNCS
      X(I)=X(I)+DESL(3*I-2)
      Y(I)=Y(I)+DESL(3*I-1)
      Z(I)=Z(I)+DESL(3*I)
1311  CONTINUE
C----
C CALCULO LOS ESFORCES NOS NCS DOS PILARES
C----
      DO 1277 J=1,NEL
      IF(NTIPC(J)-2)1277,1277,1286
1286  CONTINUE
      AUX1=L(J)
      AUX2=A(J)
      AUX3=E(J)
      AUX4=CCS(J)
      AUX5=SEN(J)
      AUX6=IZ(J)
      CALL RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
      N1=NI(J)
      N2=NF(J)
      D(1)=DESL(3*N1-2)
      D(2)=DESL(3*N1-1)
      D(3)=DESL(3*N1)
      D(4)=DESL(3*N2-2)
      D(5)=DESL(3*N2-1)
      D(6)=DESL(3*N2)
      DO 1299 I=1,6
      F(1,J)=F(1,J)+RE(1,I)*D(I)
      F(2,J)=F(2,J)+RE(2,I)*D(I)
      F(3,J)=F(3,J)+RE(3,I)*D(I)
      F(4,J)=F(4,J)+RE(4,I)*D(I)
      F(5,J)=F(5,J)+RE(5,I)*D(I)
      F(6,J)=F(6,J)+RE(6,I)*D(I)
1299  CONTINUE
1277  CONTINUE
      KONT=KONT+1
      IF(KONT-10)1433,1433,1144
1144  CONTINUE
      WRITE(3,365)
365  FORMAT(///,5X,'POSICAC DE EQUILIBRIO PARA G CARREGAMENTO',/)

```

```

WRITE(3,375)
375  FORMAT(5X,'NO',7X,'COORDENADA X',7X,'COORDENADA Y',7X,'COORDENADA
*Z')
DO 1488 I=1,NNCS
WRITE(3,385) I,X(I),Y(I),Z(I)
385  FORMAT(5X,I2,3(7X,E14.7))
1488  CONTINUE
WRITE(3,395)
395  FORMAT(///,5X,'ESFORÇOS FINAIS NAS BARRAS',//)
WRITE(3,405)
405  FORMAT(5X,'BARRA',5X,'FORÇA FINAL')
DO 1499 I=1,NEL
IF(NTIPO(I)-2)1455,1455,1499
1455  CONTINUE
WRITE(3,415) I,T(I)
415  FORMAT(5X,I3,5X,E14.7)
1499  CONTINUE
WRITE(3,445)
445  FORMAT(///,5X,'ESFORÇOS FINAIS NOS PILARES',//)
DO 1466 I=1,NEL
IF(NTIPO(I)-2)1466,1466,1477
1477  CONTINUE
WRITE(3,465) I
465  FORMAT(5X,'PILAR',I3)
WRITE(3,475) NI(I),F(2,I),F(1,I),F(3,I)
475  FORMAT(5X,'NI=',I3,5X,'N=',E14.4,5X,'Q=',E14.4,5X,'M=',E14.4)
WRITE(3,485) NF(I),F(5,I),F(4,I),F(6,I)
485  FORMAT(5X,'NF=',I3,5X,'N=',E14.4,5X,'Q=',E14.4,5X,'M=',E14.4)
1466  CONTINUE
WRITE(3,425) KONT
425  FORMAT(//,5X,'NUMERO DE ITERACCES',I3)
799  CONTINUE
11   CONTINUE
CALL EXIT
END

```

```

      SUBROUTINE RIGI(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX7,RE)
C-----
C CALCULO DA MATRIZ DE RIGIDEZ DE UMA BARRA
C (PREVENEC-SE A TRANSFORMACAO DE SISTEMA DE COORDENADAS
C LOCAL PARA GLOEAL)
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,L,O-Z)
      DIMENSION RE(6,6),RB(6,6),TC(6,6),AUX(6,6)
      DO 11 I=1,6
      DO 11 J=1,6
      RB(I,J)=0.0
11    CONTINUE
      RB(1,1)=AUX3*AUX2/AUX1
      RB(4,4)=RB(1,1)
      RB(1,4)=-RB(1,1)
      RB(4,1)=RB(1,4)
      RB(2,2)=AUX7/AUX1
      RB(5,5)=RB(2,2)
      RB(2,5)=-RB(2,2)
      RB(5,2)=RB(2,5)
      DO 22 I=1,6
      DO 22 J=1,6
      TC(I,J)=0.0
22    CONTINUE
      TC(1,1)=AUX4
      TC(2,2)=TC(1,1)
      TC(4,4)=TC(1,1)
      TC(5,5)=TC(1,1)
      TC(3,3)=1
      TC(6,6)=1
      TC(1,2)=AUX5
      TC(4,5)=TC(1,2)
      TC(2,1)=-TC(1,2)
      TC(5,4)=TC(2,1)
      DO 33 I=1,6
      DO 33 J=1,6
      AUX(I,J)=0.0
      DO 33 K=1,6
      AUX(I,J)=AUX(I,J)+TC(K,I)*RB(K,J)
33    CONTINUE
      DO 44 I=1,6
      DO 44 J=1,6
      RE(I,J)=0.0
      DO 44 K=1,6
      RE(I,J)=RE(I,J)+AUX(I,K)*TC(K,J)
44    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE RIGV(AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,AUX5,AUX6,RE)
C-----
C  CALCULO DA MATRIZ DE RIGIDEZ DE UMA VIGA
C  (PREVENEL-SE A TRANSFORMACAO DE SISTEMA DE COORDENADAS
C  LOCAL PARA GLOBAL)
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,L,C-Z)
      DIMENSION RE(6,6),RV(6,6),TC(6,6),ALX(6,6)
      DO 11 I=1,6
      DO 11 J=1,6
      RV(I,J)=0.0
11  CONTINUE
      RV(1,1)=AUX3*AUX2/AUX1
      RV(2,2)=12*AUX6*AUX3/(AUX1**3)
      RV(3,3)=4*AUX6*AUX3/AUX1
      RV(4,4)=RV(1,1)
      RV(5,5)=RV(2,2)
      RV(6,6)=RV(3,3)
      RV(1,4)=-RV(1,1)
      RV(4,1)=RV(1,4)
      RV(2,3)=6*AUX6*AUX3/(AUX1**2)
      RV(3,2)=RV(2,3)
      RV(2,6)=RV(3,2)
      RV(6,2)=RV(2,6)
      RV(3,5)=-RV(2,3)
      RV(5,2)=RV(3,5)
      RV(5,6)=RV(3,5)
      RV(6,5)=RV(5,6)
      RV(2,5)=-RV(2,2)
      RV(5,2)=RV(2,5)
      RV(3,6)=2*AUX6*AUX3/AUX1
      RV(6,3)=RV(3,6)
      DO 22 I=1,6
      DO 22 J=1,6
      TC(I,J)=0.0
22  CONTINUE
      TC(1,1)=AUX4
      TC(2,2)=TC(1,1)
      TC(4,4)=TC(1,1)
      TC(5,5)=TC(1,1)
      TC(3,3)=1
      TC(6,6)=1
      TC(1,2)=AUX5
      TC(4,5)=TC(1,2)
      TC(2,1)=-TC(1,2)
      TC(5,4)=TC(2,1)
      DO 33 I=1,6
      DO 33 J=1,6
      AUX(I,J)=0.0
      DO 33 K=1,6
      AUX(I,J)=AUX(I,J)+TC(K,I)*RV(K,J)
33  CONTINUE
      DO 44 I=1,6
      DO 44 J=1,6
      RE(I,J)=0.0

```



```

      DO 44 K=1,6
      RE(I,J)=RE(I,J)+AUX(I,K)*TC(K,J)
44    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE MMASSA(AUX1,AUX2,AUX3,NAUX,MMI)
C-----
C  CALCULO DA MATRIZ DE MASSA DE UMA BARRA
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-F,C-Z)
      REAL*8 MMI(6,6)
      DO 11 I=1,6
      DO 11 J=1,6
      MMI(I,J)=0.0
11    CONTINUE
      MMI(1,1)=(AUX3*AUX2*AUX1)/2
      MMI(2,2)=MMI(1,1)
      MMI(4,4)=MMI(1,1)
      MMI(5,5)=MMI(1,1)
      MMI(3,3)=(AUX3*AUX2*AUX1**3)/24
      IF(NAUX-2)22,22,33
22    CONTINUE
      MMI(3,3)=0.0
33    CONTINUE
      MMI(6,6)=MMI(3,3)
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE DECOM(A,N)
C-----
C ESTE SUB-PROGRAMA FAZ A DECOMPOSICAO DE UMA MATRIZ SIMETRICA EM UMA
C MATRIZ TRIANGULAR SUPERIOR
C
C A MATRIZ SIMETRICA A SER DECOMPOSTA
C N ORDEM DA MATRIZ A
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(297,297)
      IF(A(1,1))11,11,22
11  WRITE(3,5)
3   FORMAT(5X,'RADICANDO ZERO (OU NEGATIVO)')
      GO TO 33
22  A(1,1)=DSQRT(A(1,1))
      DO 44 I=2,N
44  A(1,I)=A(1,I)/A(1,1)
      DO 55 I=2,N
      I1=I-1
      D=A(I,I)
      DO 66 J=1,I1
66  D=D-A(J,I)*A(J,I)
      IF(A(1,1))11,11,77
77  A(1,I)=DSQRT(D)
      IF(N=1)88,88,99
99  I2=I+1
      DO 55 J=I2,N
      D=A(I,J)
      DO 111 L=1,I1
111 D=D-A(L,I)*A(L,J)
55  A(1,J)=D/A(1,I)
88  DO 122 I=2,N
      I1=I-1
      DO 122 J=1,I1
122 A(I,J)=0.0
33  RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE CHOLE(A,B,N)
C-----
C ESTE SUB-PROGRAMA RESOLVE UM SISTEMA DE EQUACOES LINEARES PELO METODO
C DE CHOLESKI
C
C A  MATRIZ TRIANGULAR SUPERIOR
C B  VETOR DOS COEFICIENTES INDEPENDENTES
C N  ORDEM DA MATRIZ A
C-----
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(297,297),B(297)
      B(1)=B(1)/A(1,1)
      DO 11 I=2,N
         D=B(I)
         I1=I-1
         DO 22 J=1,I1
22          D=D-A(J,I)*B(J)
11          B(I)=D/A(I,I)

      B(N)=B(N)/A(N,N)
      N1=N-1
      DO 33 L=1,N1
         K=N-L
         K1=K+1
         DO 44 M=K1,N
44          B(K)=B(K)-A(K,M)*B(M)
33          B(K)=B(K)/A(K,K)
      RETURN
      END

```