

04/12/87

CARLOS ALBERTO CAMPAGNER

Eng. Mecânico, Instituto Mauá de Tecnologia, 1978

PROJETO OTIMIZADO DE  
SUPORTES DE CAMINHOS DE  
ROLAMENTO METÁLICOS PARA  
PONTES ROLANTES

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da USP para o Título  
de Mestre em Engenharia.

*orientador*  
Orientador: Prof. Dr. Carlos C. C. Tu  
Professor Assistente Dr. do Departamento  
de Engenharia Mecânica da EPUSP.

São Paulo, 1987

FD-925

Este trabalho é  
dedicado à Carolina Seidel

Meus agradecimentos a  
Dr. Hannover, H.O.  
Gilberto Torres Tassini  
Luiz Victor Seize  
e em particular ao meu  
orientador Dr. Carlos C.C.Tu  
pelo apoio inestimável.

## RESUMO

Este Trabalho apresenta um algoritmo simples, que minimiza a seção transversal de vigas e colunas "I" usadas como suporte estrutural de caminhos de rolamentos de pontes rolantes. Devido à natureza altamente não-linear das restrições com variáveis discretas (como a bitola e larguras das chapas), os únicos métodos viáveis são baseados na busca exaustiva. A pesquisa de todas as possíveis combinações dessas variáveis (oito) foi evitada dividindo o processo de otimização em dois. As seções da viga e das colunas foram minimizadas separadamente (para busca sistemática sobre quatro variáveis de cada vez), sem considerar as interações (ou esforços) entre elas. Em seguida, esses esforços são obtidos pela análise matricial de nova estrutura combinada (problema hiperestático). Usando esses novos esforços, a viga e as colunas são otimizadas outra vez. Isto é repetido até obter a convergência. Essa convergência pode ser grandemente acelerada através de uma "boa escolha" dos pontos de partida. Nesse trabalho, os esforços são inicialmente estimados usando um modelo simplificado (isostático) dos suportes. Isto provou ser altamente eficaz pois, nos exemplos considerados, o número de interações necessárias para convergência não ultrapassou quatro.

## ABSTRACT

This paper describes a simple algorithm that finds the minimum cross sectional area of "I" shaped columns and beam used as structural supports for the rails of travelling overhead cranes. Due to the highly non-linear nature of the constraints of discrete variables (like sheet metal gages and widths), the only viable methods are based on exhaustive searches. The examination of all the possible combinations of these variables (eight) was avoided by dividing the optimization process into two. The cross sections of the beam and columns were minimized separately (by systematic search over four variables at a time) without considering the interactions (or forces) between them. Next, these forces are obtained by matrix analysis of the whole (new) structure (a statically indeterminate problem). Based on these forces, the beam and columns are optimized again. This is repeated until convergence is achieved. This convergence can be greatly accelerated by the proper choice of initial conditions. In this work, these forces are estimated, at first, based on a simplified (statically determinate) model of the supports. This proved to be highly effective since in the examples considered, the number of iterations necessary for convergence was less than four.

## Í N D I C E

1. INTRODUÇÃO
  - 1.1 - Pesquisa de Trabalhos Similares
2. OBJETIVO DO TRABALHO
3. PREMISSAS BÁSICAS E DESCRIÇÃO DO MODELO
4. ORGANIZAÇÃO GERAL DO PROCEDIMENTO
  - 4.1 - Diagrama dos Blocos
5. DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DO PROCEDIMENTO
  - 5.1 - Dados de Entrada (a)
    - 5.1.1 - Variáveis do bloco
    - 5.1.2 - Listagem do bloco
  - 5.2 - Escolha dos Carregamentos de Partida (b)
    - 5.2.1 - Variáveis do bloco
    - 5.2.2 - Listagem do bloco
    - 5.2.3 - Descrição do bloco
  - 5.3 - Otimização da Viga (c)
    - 5.3.1 - Formulação
    - 5.3.2 - Descrição do processo
    - 5.3.3 - Listagem do bloco
    - 5.3.4 - Variáveis do bloco
    - 5.3.5 - Descrição do bloco
    - 5.3.6 - Diagrama deste bloco
  - 5.4 - Otimização das Colunas (d)
    - 5.4.1 - Formulação da flambagem da coluna
    - 5.4.2 - Variáveis do bloco
    - 5.4.3 - Listagem do bloco

- 5.4.4 - Descrição do bloco
- 5.4.5 - Diagrama deste bloco

#### 5.5 - Verificação da Convergência (e)

- 5.5.1 - Variáveis do bloco
- 5.5.2 - Listagem do bloco
- 5.5.3 - Descrição do bloco

#### 5.6 - Cálculo do Carregamento Máximo da Viga (f)

- 5.6.1 - Formulação
- 5.6.2 - Observações a respeito do vetor ( $Q_0$ )
- 5.6.3 - Verificação da linearidade geométrica
- 5.6.4 - Variáveis do bloco
- 5.6.5 - Listagem do bloco
- 5.6.6 - Descrição do bloco
- 5.6.7 - Diagrama deste bloco

#### 5.7 - Cálculo do Carregamento do Peso Próprio (g)

- 5.7.1 - Formulação
- 5.7.2 - Listagem do bloco
- 5.7.3 - Variáveis do bloco
- 5.7.4 - Descrição do bloco
- 5.7.5 - Diagrama deste bloco

#### 5.8 - Cálculo do Carregamento Máximo nas Colunas (h)

- 5.8.1 - Formulação
- 5.8.2 - Listagem do bloco
- 5.8.3 - Variáveis do bloco
- 5.8.4 - Descrição do bloco
- 5.8.5 - Diagrama deste bloco

- 6. EXEMPLOS
- 7. CONCLUSÃO
- 8. BIBLIOGRAFIA

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Os Caminhos de Rolamento
- Figura 2 Diagrama de Blocos do Procedimento Geral
- Figura 3 Momento Vertical Máximo na Viga
- Figura 4 Momento Horizontal Máximo na Viga
- Figura 5 Força Normal Máxima na Coluna
- Figura 6 Momento Máximo na Coluna Devido à Força Longitudinal
- Figura 7 Seção Transversal Típica
- Figura 8 Diagrama do Bloco C
- Figura 9 Diagrama do Bloco D
- Figura 10 Numeração dos Nós no Cálculo Matricial
- Figura 11 Matriz de Rigidez da Viga
- Figura 12 Matriz de Rigidez da Coluna
- Figura 13 Matriz de Rotação da Coluna
- Figura 14 Matriz de Rigidez das Colunas no Sistema Geral de Referência
- Figura 15 Matriz de Rigidez dos Nós Livres da Estrutura (Quadrada)
- Figura 16 Matriz de Rigidez dos Nós Livres da Estrutura (Semi-Banda)
- Figura 17 Vetor de Carregamentos Externos do Engrenamento Perfeito
- Figura 18 Diagrama do Bloco F
- Figura 19 Diagrama do Bloco G
- Figura 20 Diagrama do Bloco H



## 1. INTRODUÇÃO

Ao se deparar com o projeto de uma estrutura os engenheiros, no passado, lançavam mão de modelos muito simplificados e de cálculos aproximados através de teorias simplistas. Tais métodos, por conterem muitas incertezas, levavam a uma estrutura excessivamente reforçada. Com o passar do tempo e o advento dos computadores, não só os modelos tornaram-se mais realistas, como as teorias perderam a sua simplificação para obter uma maior precisão por meio de uma formulação mais complexa. Neste momento, com a facilidade para o cálculo, partiu-se para estruturas mais otimizadas. Porém, por incrível que possa parecer, o próprio computador limitou (por problema de custo) esta maior complexidade de cálculos e uma maior preocupação pela otimização. Com o surgir do microcomputador, todavia, tais dificuldades foram bastante atenuadas pelo baixo custo inicial, facilidade de operação e quase inexistente custo de operação. Em contrapartida, existe a limitação da capacidade dos equipamentos (que vem aumentando a cada dia) e o tempo de processamento sensivelmente maior que, no caso presente, não possui grande peso.

Outro fator de diferenciação dos grandes computadores para os microcomputadores é a generalização de utilização dos primeiros em confronto com a utilização mais específica dos outros. Como os computadores de grande porte são utilizados geralmente para a resolução de problemas, não de uma só área ou mesmo de uma mesma empresa, foram desenvolvidos programas cada vez mais gerais para o cálculo de estruturas. Nos microcomputadores tal generalização, não de todo, foi abandonada em favor de programas cada vez mais especializados. Logo, com o obstáculo do custo superado, nascem programas para determinados tipos de estruturas com um alto grau de certeza de modelagem e formulação.

No caso específico de bases para caminhos de rolamento de pontes rolantes, a importância cresce na medida em que o custo do mesmo, não em raras vezes, supera em muito o custo da própria ponte rolante, justificando-se um estudo mais

aprofundado do mesmo.

Tal estrutura de base do caminho de rolamento, integrada ou não ao prédio, possui certas particularidades de esforços que a tornam um caso bem particularizado de estrutura metálica.

Em conclusão, programas de otimização de estruturas específicas em microcomputadores são cada vez mais comuns e importantes pela sua precisão e baixo custo, principalmente quando aplicados a estruturas de custo elevado e utilizado por firmas de médio e pequeno porte.

### 1.1 Pesquisa de Trabalhos Similares

Na pesquisa realizada, os trabalhos encontrados eram, na sua grande maioria, sobre otimização de peso de estruturas ou muito simples (caso de treliças com uma só condição de contorno) ou muito complexas com a utilização, inclusive, de mudança de materiais (caso de estruturas de aviões). Os de interesse, por se relacionarem com esse, serão analisados a seguir.

Nos trabalhos correlatos usa-se, na maioria, programações matemáticas para variáveis contínuas (ver, por exemplo, Nelson (8), Felton (9), Morris (18), Huag (21), Bronowicki (24) e Fernandes (25)). Neles, os vínculos são em número pequeno e as variáveis utilizadas, normalmente, restritas a duas. A dificuldade de alguns deles (por exemplo, Fernandes (25)), está na obtenção do ótimo discreto depois de encher o ótimo contínuo e, nos outros casos, a utilização do ótimo contínuo.

Nos que utilizam variáveis discretas temos Woiler (17) e Huanchun (27), onde notamos que o problema combinatorial é o grande desafio a ser vencido (ver 5.3.2 para maiores detalhes). Como podemos notar, os trabalhos que utilizam variáveis discretas são em menor número e, talvez, mais atuais.

No gèral, a escassez de literatura se deve ao fato de que, no exterior, o peso da matéria prima no custo final de uma estrutura é muito menos significativa do que no Brasil.

## 2. OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo a otimização automatizada para microcomputadores de suporte de caminhos de rolamento para pontes rolantes de pequena capacidade. Tal suporte é constituído de uma viga contínua, sobre a qual está o caminho de rolamento da ponte rolante, viga esta suportada por colunas, igualmente espaçadas, apoiadas e firmemente presas a uma base (Figura 1).

Os esforços que a ponte impõe à estrutura são, obviamente, transmitidos pelas rodas, sendo divididos em três direções: reação máxima por roda (R), forças transversais (FT) e forças longitudinais (FL). Será considerado o estado de tensões e flambagens dos elementos dos perfis devido a esses esforços.

O resultado final do estudo será um programa para microcomputador que fornecerá para cada grupo de dados de entrada, uma estrutura otimizada (isto é com menores seções transversais. Como na maioria dos casos, o comprimento da viga é aproximadamente igual à soma das alturas das colunas, isto implica, na minimização da quantidade de material em condições de esforços internos abaixo dos admissíveis.)

Deve ser enfatizado que o trabalho foi inteiramente idealizado para que, a cada passo, as técnicas mais adequadas fossem utilizadas visando a utilização de microcomputadores.

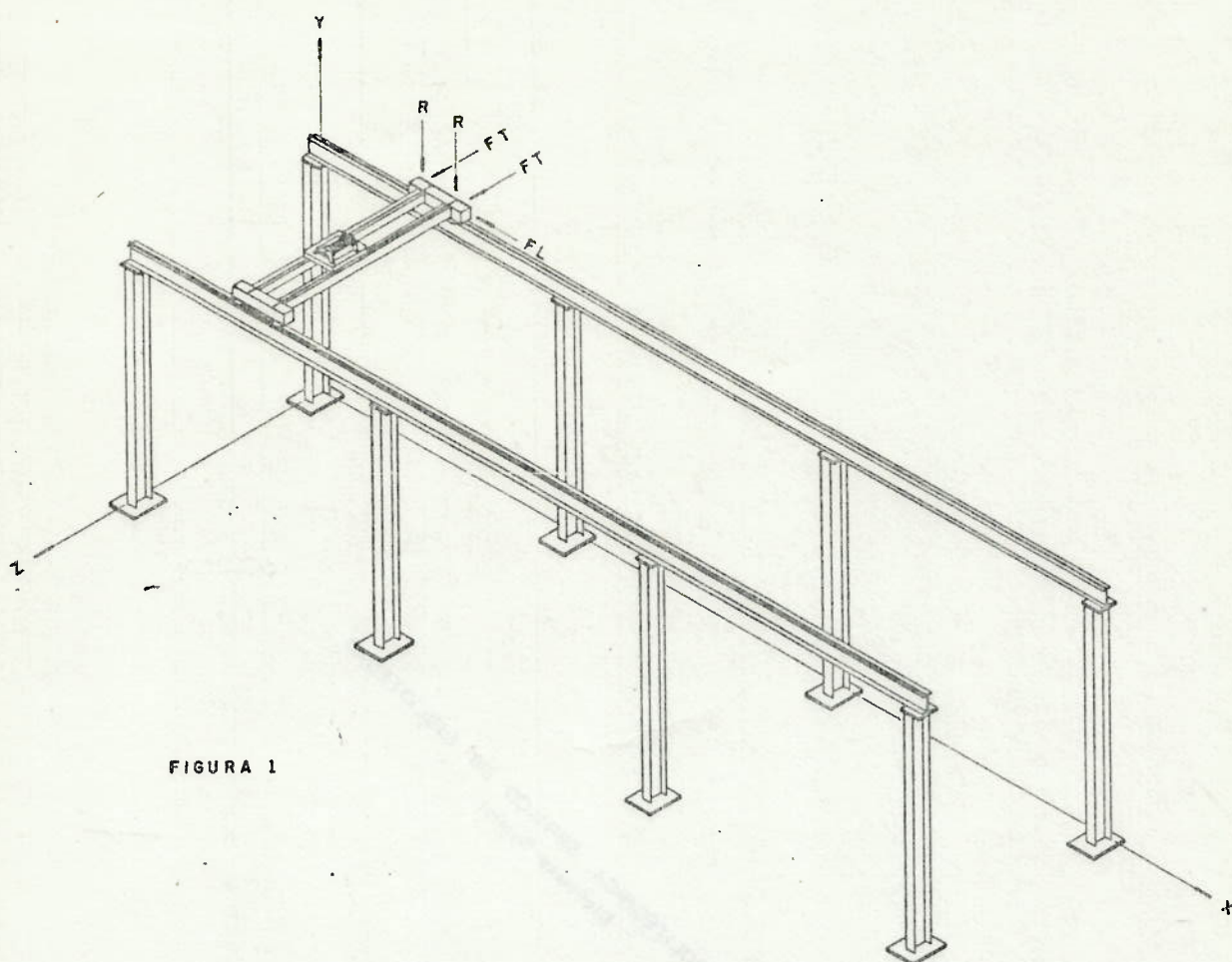


FIGURA 1

Fig.1 - Os Caminhos de Rolamento

## 3. PREMISSAS BÁSICAS E DESCRIÇÃO DO MODELO

Como todo trabalho, este também partirá de certas premissas; porém, como se trata de uma resolução numérica de um problema, estas premissas são mais numerosas. As básicas são:

- a) consideraremos que a ponte não serve de elo para os esforços de um para outro caminho de rolamento; logo, cada caminho de rolamento e suas bases trabalham independentes;
- b) as alturas das colunas, bem como o seu espaçamento, são valores constantes para cada entrada de dados, e os perfis das colunas serão iguais;
- c) a ponte rolante será única no caminho de rolamento;
- d) a ponte rolante possuirá quatro rodas, sendo duas por cabeceira, com mesma reação máxima e motorização e frenagem em duas rodas, uma por cabeceira;
- e) tanto a viga como as colunas terão seções formadas por perfis "I" de aço soldado de mesas, superior e inferior, de mesma largura e espessura, sendo que a largura das mesmas não terá dimensão maior que a altura da alma;
- f) a estrutura será considerada com os engastamentos perfeitos e sem rotações relativas entre membros incidentes no mesmo nó;
- g) a estrutura será considerada também de comportamento linear física e geometricamente, segundo Souza Lima (1) e Venâncio (2);
- h) nas dimensões dos perfis "I", tanto a altura da alma, largura das mesas, como todas as espessuras, são dimensões discretas e não contínuas, e escalonadas com um valor fixo para altura de alma e largura das mesas e, ou

tro, para as espessuras;

- i) serão desprezados os efeitos dinâmicos;
- j) será utilizado o aço ASTM-A36 (comum no Brasil), por sua semelhança ao aço ST37 no que concerne aos dados e tabelas das normas DIN4132 (10) e DIN4114 (11); tal semelhança é bastante justificável pela proximidade entre as tensões de escoamento  $250 \text{ N/mm}^2$  e  $240 \text{ N/mm}^2$ , respectivamente;
- k) serão desprezados os efeitos de força cortante nos elementos e de torção nas colunas;
- l) serão desprezados os pesos próprios das colunas;
- m) a estrutura será considerada em ambiente interno (sem efeitos de vento);
- n) serão desprezados os efeitos de carregamentos especiais previstos nas normas DIN4132 (10) e DIN4114 (11);
- o) não será considerada a colaboração do trilho junto com a viga por, normalmente, não se poder garantir a perfeita união entre ambos.
- p) será admitido que ao minimizar as seções transversais da viga e colunas, o peso total da estrutura será minimizada. Isto é absolutamente correto só para o caso em que o comprimento da viga é igual à soma das alturas das colunas. Porém para a maioria das estruturas para caminhos de rolamento de pontes rolantes usuais, os comprimentos são aproximadamente iguais.

## 4. ORGANIZAÇÃO GERAL DO PROCEDIMENTO

O programa completo está dividido em blocos que se interagem da seguinte maneira:

## 4.1 Diagrama dos Blocos

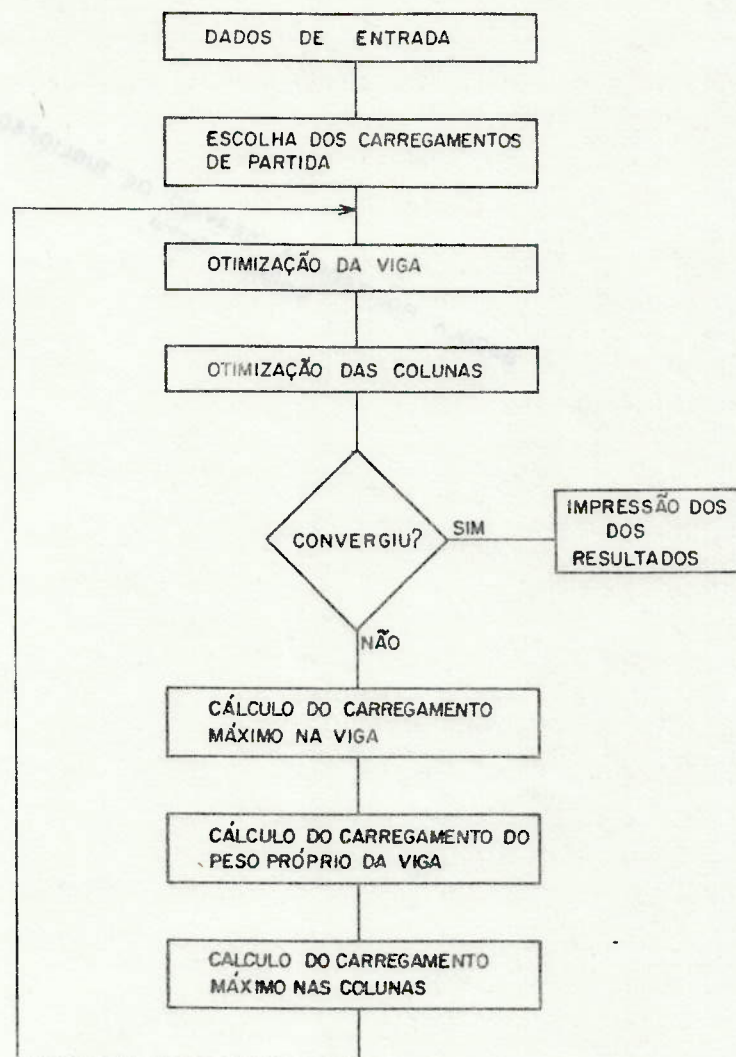


Fig. 2 - Diagrama dos Blocos



## 5. DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DE PROCEDIMENTO

A seguir será descrito cada um dos blocos que compõe o programa. Cada bloco é um subprograma gravado em disquete e encadeado aos demais conforme mostra a figura 2. A linguagem utilizada foi MBASIC em um equipamento do tipo "Apple IIe".

O encadeamento entre os blocos foi feito com a gravação e recuperação de dados em arquivos sequenciais em disquete.

A utilização da impressora visa a documentação da otimização, para cada entrada de dados.

Foi utilizado o Sistema Internacional de unidades na entrada e saída de dados; porém, para uma melhor precisão em microcomputadores, tais medidas foram transformadas logo após a entrada de dados e retransformadas ao final.

### 5.1 Dados de Entrada (a)

Este bloco tem como finalidade verificar se as informações de entrada são consistentes, converter em unidades mais convenientes para o programa, gravar em arquivo sequencial em disquete tais dados para posterior utilização pelos blocos posteriores e inicializar o bloco de verificação de otimização.

Escolherá também os coeficientes de majoração, segundo o grupo da ponte DIN4132(10) para a viga e coluna.

A gravação de tais dados se dará em um arquivo chamado "D.T." e anulará as variáveis do arquivo "OK.T." do bloco e (verificação de convergência).

Ao final apagará as variáveis pelo comando "CLEAR" e encadeará o próximo bloco "C.BAS" (b) (escolha dos carregamentos de partida).

## 5.1.1 Variáveis do Bloco

P - reação máxima por roda  
 PT - força transversal por roda  
 PL - força longitudinal por roda  
 GS - grupo da ponte segundo DIN 4132(10)  
 L - distância entre colunas  
 H - altura das colunas  
 AA - distância entre rodas  
 N - número de colunas  
 FIV - coeficiente de majoração da viga  
 FIC - coeficiente de majoração da coluna

Obs.: Da lista acima todos os dados até o número de colunas serão os dados de entrada.

## 5.1.2 Listagem do Bloco

```

10 'ENTRADA DE DADOS
20 '*****
30 INPUT"REACAO MAXIMA DE RODA EM KILONEWTONS";P
40 P=P/10
50 INPUT"FORCA TRANSVERSAL POR RODA EM KILONEWTONS";PT
60 PT=PT/10
70 INPUT"FORCA LONGITUDINAL EM KILONEWTONS";PL
80 PL=PL/10
90 INPUT"GRUPO DA PONTE SEGUNDO DIN 4132";GS
100 '*****
110 'ESCOLHA DOS COEFICIENTES DE MAJORACAO SEGUNDO NORMA DIN 4132
120 IF GS="H1" THEN FIV=1.1
130 IF GS="H1" THEN FIC=1.1
140 IF GS="H2" THEN FIV=1.2
150 IF GS="H2" THEN FIC=1.1
160 IF GS="H3" THEN FIV=1.3
170 IF GS="H3" THEN FIC=1.2
180 IF GS="H4" THEN FIV=1.4
190 IF GS="H4" THEN FIC=1.3
200 INPUT"DISTANCIA ENTRE COLUNAS EM CENTIMETROS";L
210 INPUT"ALTURA DE COLUNAS EM CENTIMETROS";H
220 INPUT"DISTANCIA ENTRE RODAS EM CENTIMETROS";AA
230 INPUT"NUMERO DE COLUNAS";N
240 LPRINT"P=";P;"PT=";PT;"PL=";PL;"GR=";GS;"L=";L;"H=";H;"AA=";AA;"N=";N
250 '*****
260 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME D.T
270 P%=STR$(P)
280 PT%=STR$(PT)
290 PL%=STR$(PL)
300 FIV%=STR$(FIV)
  
```

```
300 FIV%=STR$(FIV)
310 FIC%=STR$(FIC)
320 L%=STR$(L)
330 H%=STR$(H)
340 AA%=STR$(AA)
350 N%=STR$(N)
360 OPEN"0",#1,"D.T"
370 PRINT#1,P%";",";PT%";",";PL%";",";FIV%";",";FIC%";",";L%";",";H%";",";AA%";",";N%
380 CLOSE#1
390 '*****
400 'ZERAMENTO DO ARQUIVO OK.T
410 H%=STR$(0)
420 OPEN"0",#1,"OK.T"
430 PRINT#1,H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%";",";H%
440 CLOSE#1
450 '*****
460 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA C.BAS
470 CLEAR
480 CHAIN"C
```

## 5.2 Escolha dos Carregamentos de Partida (b)

Tratando-se de um processo numérico, deveremos adotar certos carregamentos externos para podermos iniciar o procedimento.

A priori qualquer carregamento de partida poderia ser usado, porém, como um estudo destes carregamentos podemos a celerar em muito o procedimento. Nos exemplos apresentados mais adiante podemos notar que o procedimento aqui adotado surte efeito, pois em duas passagens pelo bloco de verificação de convergência (na maioria dos casos) o processo é completado.

Esses esforços serão considerados para a estrutura dividida em trechos isostáticos.

### 5.2.1 As Variáveis deste Bloco são:

P, PT, PL, AA, GR, L, H, N - vide bloco anterior

MG - momento vertical devido ao peso próprio

MV - momento vertical de partida

MH - momento horizontal de partida

PC - força normal nas colunas de partida

MCP - momento provocado na coluna, pela força longitudinal, de partida

MCL - momento provocado na coluna, pelas forças transversais, de partida.

## 5.2.2 Listagem do bloco

```

10 'ESCOLHA DOS CARREGAMENTOS DE PARTIDA
20 '*****
30 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME D.T
40 OPEN"1",#1,"D.T"
50 INPUT#1,P$,PT$,PL$,FIV$,FIC$,L$,H$,AA$,N$
60 P=VAL(P$)
70 PT=VAL(PT$)
80 PL=VAL(PL$)
90 FIV=VAL(FIV$)
100 FIC=VAL(FIC$)
110 L=VAL(L$)
120 H=VAL(H$)
130 AA=VAL(AA$)
140 N=VAL(N$)
150 CLOSE#1
160 '*****
170 'FORMULACAO
180 MV=2*P*(L/2-AA/4)^2/L
190 MH=2*PT*(L/2-AA/4)^2/L
200 PC=P+P*(L-AA)/L
210 MCP=PL*MH/N
220 MCL=(PT+PT*(L-AA)/L)*H
230 PRINT"CHUTE INICIAL"
240 PRINT"MV=";MV;"MH=";MH;"PC=";PC;"MCP=";MCP;"MCL=";MCL
250 '*****
260 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME C.T
270 MV$=STR$(MV)
280 MH$=STR$(MH)
290 PC$=STR$(PC)
300 MCP$=STR$(MCP)
310 MCL$=STR$(MCL)
320 MG$=STR$(0)
330 OPEN"0",#2,"C.T"
340 PRINT#2,MV$;" ";MH$;" ";PC$;" ";MCP$;" ";MCL$;" ";MG$
350 CLOSE#2
360 '*****
370 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA M.BAS
380 CLEAR
390 CHAIN"M

```

## 5.2.3 Descrição do Bloco

Para os carregamentos da viga será adotada a fórmula de máximos momentos fletores em uma viga biapoiada. A posição de máximo momento é de  $(L/2 - AA/4)$  e os momentos serão:

$$MV = 2 * P * (L/2 - AA/4)^2 / L \quad (\text{Vide Fig.3}) \quad (1)$$

$$MH = 2 * PT * (L/2 - AA/4)^2 / L \quad (\text{Vide Fig.4}) \quad (2)$$

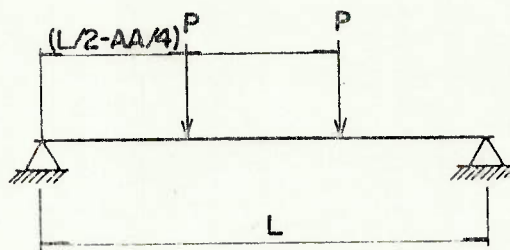


Fig. 3 - Momento Vertical Máximo na Viga

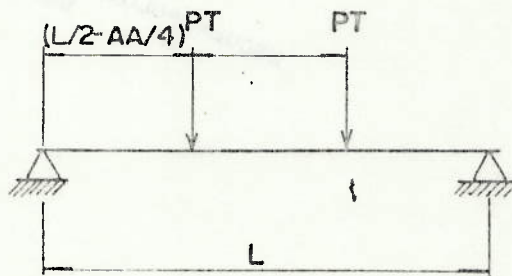


Fig. 4 - Momento Horizontal Máximo na Viga

Para os carregamentos na coluna teremos o ponto do máximo com a ponte com uma roda sobre a primeira coluna. Consideraremos os carregamentos na primeira coluna da estrutura do modo como as reações de apoio da viga foram acima descritas. Tal posição é de máximo, por haver somente uma roda com forças longitudinais.

Para a força normal  $PC$  temos:

$$PC = P + P * (L - AA) / L \quad (\text{Vide Fig.5}) \quad (3)$$

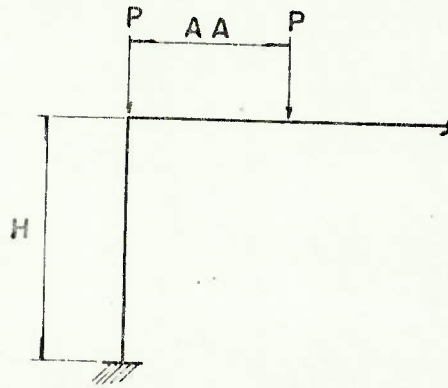


Fig. 5 - Força Normal Máxima na Coluna

Para o momento da força longitudinal, esta será a mesma vezes a altura da coluna, dividida pelo número de colunas, como se tal esforço fosse distribuído igualmente pelas N colunas.

$$MCP = PL * H/N$$

(Vide Fig.6) (4)

Para o momento devido às forças transversais acharemos a reação de apoio como se viga fosse biapoiada e multiplicaremos pela altura da coluna, como se somente esta coluna suportasse tal esforço.



Fig. 6 - Momento Máximo na Coluna Devido à Força Longitudinal

$$MCL = (PT + PT*(L - AA)/L) * H$$

(Vide Fig.4) (5)

Determinados tais esforços iniciais, estes serão gravados em um arquivo "C.T.", após o que será chamado o próximo bloco de nome "M.BAS". (c)

Obs.: serão nulos os esforços devido ao peso próprio neste bloco, por esta razão a variável  $MG$  está anulada.

### 5.3 Otimização da Viga (c)

A estrutura é constituída de perfis "I" com o seguinte esquema geral:

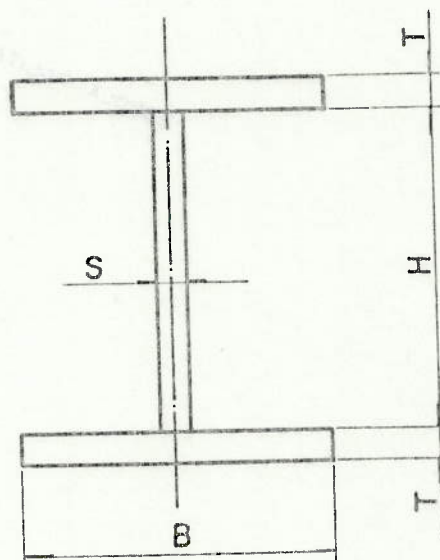


Fig.7 - Seção Transversal Típica

A viga será considerada um sub-sistema a ser otimizado - como se segue.



## 5.3.1 Formulação

A função objetivo a ser minimizada será:

$$\text{Area} = 2*B*T + H*S \quad (6)$$

com quatro incógnitas B, T, H e S.

A função objetiva está sujeita aos seguintes vínculos de tensões abaixo de admissíveis em relação à tensão de escoamento e às flambagens:

$$a) \quad \sigma_1 \leq \bar{\sigma}_1 \quad (7)$$

$$b) \quad \sigma_2 \leq \bar{\sigma}_2 \quad (8)$$

$$c) \quad \gamma_{aI} \geq \bar{\gamma}_{aI} \quad (9)$$

$$d) \quad \gamma_{aII} \geq \bar{\gamma}_{aII} \quad (10)$$

$$e) \quad \sigma_{f1} \leq \bar{\sigma}_{f1} \quad (11)$$

$$f) \quad \sigma_{f2} \leq \bar{\sigma}_{f2} \quad (12)$$

$$g) \quad \gamma_{bI} \geq \bar{\gamma}_{bI} \quad (13)$$

$$h) \quad \gamma_{bII} \geq \bar{\gamma}_{bII} \quad (14)$$

$$i) \quad H \geq B \quad (15)$$

Que são os casos de carga e de flambagens das normas DIN4132(10) e DIN4114(11) conforme se segue:

- a) Caso de cargas principais: Neste caso de carga são incluídas as reações máximas de roda vezes um coeficiente de majoração que depende do grupo da ponte (tendo sido escolhido no bloco de dados de entrada) mais as forças devido ao peso próprio.

$$\sigma_1 = \frac{MT}{W_x} \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_1 = 14 \text{ KN/cm}^2 \quad (17)$$

- b) Caso de cargas adicionais: Neste caso de carga são incluídas todas as cargas do caso principal, sem os coeficientes de majoração, mais os esforços causados pelas cargas horizontais.

Obs.: neste caso de carga, como a força transversal está aplicada na aba superior do perfil e o mesmo está preso pela aba inferior, segundo Gregor(12), somente metade do perfil trabalha na flexão lateral, explicando o módulo de flexão lateral (WY) estar dividido por dois.

$$\sigma_2 = \frac{(MV + MG)}{W_x} + \frac{2MH}{W_y} \quad (18)$$

$$\bar{\sigma}_2 = 16 \text{ KN/cm}^2 \quad (19)$$

- c) Flambagem da aba superior: para o caso de cargas principais a formulação segundo DIN4114(11), Timoshenko (13), Roark(14) e Hannover(15).

$$\alpha = \frac{2l}{b} \quad (20)$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E T_1^2}{12b^2(1 - \mu^2)} \quad (21)$$

$$\sigma_{ki} = k \sigma_e \quad (22)$$

$$\gamma_{aI} = \frac{\sigma_{ki}}{\sigma_1} \quad (23)$$

onde:

l - comprimento da viga entre colunas

b - largura da aba

$\sigma_e$  - tensão de flambagem de Euler

$\mu$  - módulo de elasticidade transversal

E - módulo de elasticidade

K - coeficiente de flambagem tabelado em (11), (13) e (14)

$\sigma_{ki}$  - tensão de ideal de comparação

$v_{a,I}$  - coeficiente de segurança atuante

$\bar{v}_{aI}$  - coeficiente de segurança segundo (10) igual a 1,5

d) Flambagem da aba superior: para o caso de cargas adicionais que é igual ao item C só que o coeficiente de segurança é 1,35.

Obs.2: Será desprezado o caso de cargas especiais que seriam as cargas de batedores, porque é muito comum, hoje em dia, a utilização de chaves de fim de curso na ponte, ou a utilização de batedores especiais para diminuir este efeito.

e) Flambagem lateral: para o caso de cargas principais, formulação é segundo (11), (13), (14) e (15).

$$\bar{\sigma}_{f1} = \frac{\xi S_{ki} H}{2 Jx v} \left[ \sqrt{\left( \frac{5v}{x} \right)^2 + c^2} - \frac{5v}{x} \right] \quad (24)$$

onde:

$v = 1,71$  - coeficiente de segurança

$$x = \frac{\pi^2}{\beta^2} \quad (25)$$

$\beta$  é um coeficiente que depende do grau de engastamento das extremidades da viga e que no nosso caso = 1.

$$S_{ki} = \frac{x E J_y}{L^2} \quad (26)$$

é a carga de flambagem de Euler

$$v = \frac{H}{2} \quad (27)$$

é a distância do ponto de aplicação da carga transversal até o eixo principal de inércia.

$$\xi = 1,35 \quad (28)$$

$\xi$  é um coeficiente que depende da forma do diagrama do momento fletor e que no nosso caso é 1,35.

$$c = \sqrt{\frac{cm + 0,039 l^2 J_D}{J_y}} \quad (29)$$

é o raio de giro da secção

$$cm = \frac{B T_1^3 (H+T_1)^2}{24} \quad (30)$$

é o módulo referido ao centro de esforços cortantes

$$J_D = \frac{2 T_1^3 B + H T_2^3}{3} \quad (31)$$

é o momento à torsão

$$v = 1,71 \quad (32)$$

f) Flambagem lateral: para o caso de cargas adicionais, a formulação é a mesma que no caso anterior, somente que coeficiente de segurança vale:

$$v = 1.5 \quad (33)$$

g) Flambagem da alma: para o caso de cargas principais e adicionais a formulação é igual ao item C com

$$\bar{v}_{bI} = 1,35 \quad (34)$$

$$\bar{v}_{bII} = 1,25 \quad (35)$$

h) A condição  $H \geq B$  faz parte das premissas iniciais

Obs.: Os esforços hiperestáticos são obtidos no bloco b ou blocos f e g

### 5.3.2 Descrição do Processo

Como podemos notar a função objetivo a ser minimizada é relativamente simples, mas mesmo a mais simples inequação dos vinculos é de difícil manipulação e linearização para a otimização desejada.

Para a confecção das vigas "I" são sempre usadas chapas comerciais que, obviamente, vêm em bitolas discretas. Também, foi utilizado larguras de chapas discretas por imposições de fabricação. Portanto, os métodos de programação para variáveis contínuas não podem ser usados, porque segundo Bradley (20) (pag.386), o ponto de ótimo do contínuo pode estar bem longe do ótimo do discreto.

Se a função objetivo e as restrições fossem lineares ou linearizáveis, a técnica de Programação Linear Inteira ("Integer Programming") poderia ser utilizada. Infelizmente, este não é o caso aqui. Portanto, o método de busca sistemática é, além de indicado, um dos únicos viáveis, pelo altíssimo grau de dificuldade resultante do número de restrições ser muitas vezes maior que o número de incógnitas (ver Converse (5) e Novaes (6)).

Neste trabalho, a otimização foi dividida em duas etapas bem naturais (otimização de seção da viga e otimização da seção das colunas).

Desta maneira, para cada etapa, só quatro variáveis necessitam ser pesquisadas. Porém, a otimização da coluna influenciou na otimização da viga e vice-versa, não só ao que se refere ao cálculo hiperestático, como também na posição da ponte rolante de máximo esforço externo. Portanto, há a necessidade de um processo iterativo convergente para se obter a viga ótima juntamente com a coluna ótima.

Como todo processo iterativo, a convergência deste problema pode ser drasticamente acelerada com uma escolha inteligente dos esforços de partida, já comentados (ver 5.2.3). A prática tem demonstrado que esse procedimento é altamente eficaz como demonstram os exemplos apresentados.

Os procedimentos para a otimização da viga (bloco c) e das colunas (bloco d) são idênticos. Em ambos os casos, foi utilizada a técnica de busca sistemática que consiste em examinar cada combinação possível de área transversal,  $A$  ( $A = 2 BT + HS$ ).

Nota-se no diagrama de blocos (seção 5.3.5) que a ordem de busca pelas variáveis (primeiro H, depois B, F e, finalmente, S), foi escolhida para que  $A \ll A_{min}$  na maioria das verificações feitas (o que torna o algoritmo muito mais rápido).

Portanto é vantajoso localizar os mais baixos valores de Amin logo no início da busca. Isto é conseguido varrendo primeiramente as variáveis que afetam mais as tensões resultantes na viga, que é na ordem acima.

### 5.3.3 Listagem do Bloco

```

10 'OTIMIZACAO DA VIGA
20 '*****
30 'LEITURA DO ARAQUIVO DE NOME D.T
40 OPEN"1",#1,"D.T"
50 INPUT#1,P$,PT$,PL$,FIV$,FIC$,L$,H$,AA$,N$
60 P=VAL(P$)
70 PT=VAL(PT$)
80 PL=VAL(PL$)
90 FIV=VAL(FIV$)
100 FIC=VAL(FIC$)
110 L=VAL(L$)
120 H1=VAL(H$)
130 AA=VAL(AA$)
140 N=VAL(N$)
150 PRINT P,L,H1,AA,N
160 CLOSE#1
170 '*****
180 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME C.T
190 OPEN"1",#2,"C.T"
200 INPUT#2,MV$,MH$,PC$,MCP$,MCL$,MG$
210 MV=VAL(MV$)
220 MH=VAL(MH$)
230 MG=VAL(MG$)
240 CLOSE#2
250 '*****
260 'INICIO DO LOOPING DE BUSCA DOS PERFIS
270 PRINT MV,MH
280 AREAOK=999999!
290 FOR T2=.635 TO 1.5875 STEP .3175
300 FOR T1=.635 TO 1.905 STEP .3175
310 FOR B=10 TO 70 STEP 10
320 FOR H=10 TO 100 STEP 10
330 '*****
340 'CONDICAO DE CONTORNO H>=B
350 IF B>H THEN GOTO 1050
360 '*****
370 'CONDICAO DE MINIMA AREA
380 AREA=2*B*T1+H*T2
390 IF AREA>AREAOK THEN 1050
400 '*****

```

```

400 *****
410 'CONDICAO DE CONTORNO DE TENSAO PARA CARREGAMENTO PRINCIPAL
420 G=AREA*.785
430 O1=(2*T1+H)/2
440 JX=B*T1^3/6+T2*H^3/12+2*B*T1*(O1-T1/2)^2
450 JY=T1*B^3/6+H*T2^3/12
460 WX=JX/O1
470 WY=JY*2/B
480 MT=FIU*MV+MG
490 SI=MT/WX
500 IF SI>1.4 THEN 1050
510 *****
520 'CONDICAO DE CONTORNO DE TENSAO PARA CARREGAMENTO ADICIONAL
530 SII=(MV+MG)/WX+MH*2/WY
540 IF SII>1.6 THEN 1050
550 *****
560 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DA ABA
570 AL=2*L/B
580 IF AL<=.5 THEN K=3.62
590 IF AL>.5 AND AL<=1 THEN K=1.18
600 IF AL>1 AND AL<=1.2 THEN K=.934
610 IF AL>1.2 AND AL<=1.4 THEN K=.784
620 IF AL>1.4 AND AL<=1.6 THEN K=.687
630 IF AL>1.6 AND AL<=1.8 THEN K=.622
640 IF AL>1.8 AND AL<=2! THEN K=.574
650 IF AL>2! AND AL<=2.5 THEN K=.502
660 IF AL>2.5 AND AL<=3! THEN K=.464
670 IF AL>3! AND AL<=4! THEN K=.425
680 IF AL>4! THEN K=.416
690 SKK=K*(2756*T1/B)^2/1000
700 VI=SKK/SI
710 VII=SKK/SII
720 IF VI<1.5 THEN 1050
730 IF VII<1.35 THEN 1050
740 *****
750 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM LATERAL
760 JD=(2*B*T1^3+H*T2^3)/3
770 CM=8*T1^3*(H-T1)^2/24
780 C=SQR((CM*L^2/H^2+.039*L^2*JD)/JY)
790 PI=3.14159
800 SKI=PI^2*2100*JY/L^2
810 V=O1
820 SIKI=1.35*SKI*(O1-T1/2)/JX*(SQR((5*V/PI^2)^2+C^2)-5*V/PI^2)
830 SIGAD1=SIKI/1.71
840 SIGAD2=SIKI/1.5
850 SFI=NT/WX
860 SFII=(MV+MG)/WX
870 IF SFI>SIGAD1 THEN 1050
880 IF SFII>SIGAD2 THEN 1050
890 *****
900 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DA ALMA

```



```

900 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DA ALMA
910 KK=23.9
920 SAK=KK*(1378*T2/H)^2/1000
930 VAI=SAK/SI
940 VAII=SAK/SII
950 IF VAI<1.35 THEN 1050
960 IF VAII<1.25 THEN 1050
970 '*****
980 'FIN DO LOOPING DE BUSCA DO PERFIL
990 AREAOK=AREA
1000 BB=B
1010 HH=H
1020 TT1=T1
1030 TT2=T2
1040 LPRINT"H=";H;"B=";B;"T1=";T1;"T2=";T2
1050 NEXT H
1060 NEXT B
1070 NEXT T1
1080 NEXT T2
1090 '*****
1100 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME H.T
1110 LPRINT"VIGA B=";BB;"H=";HH;"T1=";TT1;"T2=";TT2
1120 H=HH
1130 B=BB
1140 T1=TT1
1150 T2=TT2
1160 H%=STR$(H)
1170 B%=STR$(B)
1180 T1%=STR$(T1)
1190 T2%=STR$(T2)
1200 OPEN"O",#1,"H.T"
1210 PRINT#1,H%,"";B%,"";T1%,"";T2%
1220 CLOSE#1
1230 '*****
1240 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME J.T
1250 AREA=2*B*T1+H*T2
1260 O1=(B*T1^2/2+H*T2*(T1+H/2)+B*T1*(H+3*T1/2))/AREA
1270 JX=B*T1^3/6+T2*H^3/12
1280 JX=JX+B*T1*(O1-T1/2)^2+H*T2*(O1-T1-H/2)^2+B*T1*(O1-H-3*T1/2)^2
1290 JY=T1*B^3/6+H*T2^3/12
1300 JT=(2*B*T1^3+H*T2^3)/3

```

```
1300 JT=(2*B*T1^3+H*T2^3)/3
1310 PRINT"VIGA ";AREA;JT;JX;JY
1320 AREA$=STR$(AREA)
1330 JT$=STR$(JT)
1340 JX$=STR$(JX)
1350 JY$=STR$(JY)
1360 OPEN"0",#2,"J.T"
1370 PRINT#2,AREA$;" ";JT$;" ";JX$;" ";JY$
1380 CLOSE#2
1390 *****
1400 ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA MC.BAS
1410 CLEAR
1420 CHAIN"MC"
```

## 5.3.4 Variáveis do Bloco

P, PT, PL, FIV, FIC, L, H1, AA, N - vide bloco

a - somente a altura das colunas que foi mudada para H1.

MV, MH, MG - vide bloco b, f e g

H, B, T1, T2 - vide figura 3

AREA - área da seção do perfil

C1 - distância entre o centro de gravidade e a aba do perfil

JX - momento de inércia em relação ao eixo horizontal principal

JY - momento de inércia em relação ao eixo vertical principal

WX - módulo de flexão horizontal

WY - módulo de flexão vertical

MT - momento total para o caso de carga principal

AL, K, SKK, VI, VII, JD, CM, C, SKI, V, SIKI, SIGAD1, SIGA2, SFI, SFII, KK, SAK, VAI, VAII - vide formulação a seguir:

AREAOK - área do perfil otimizado

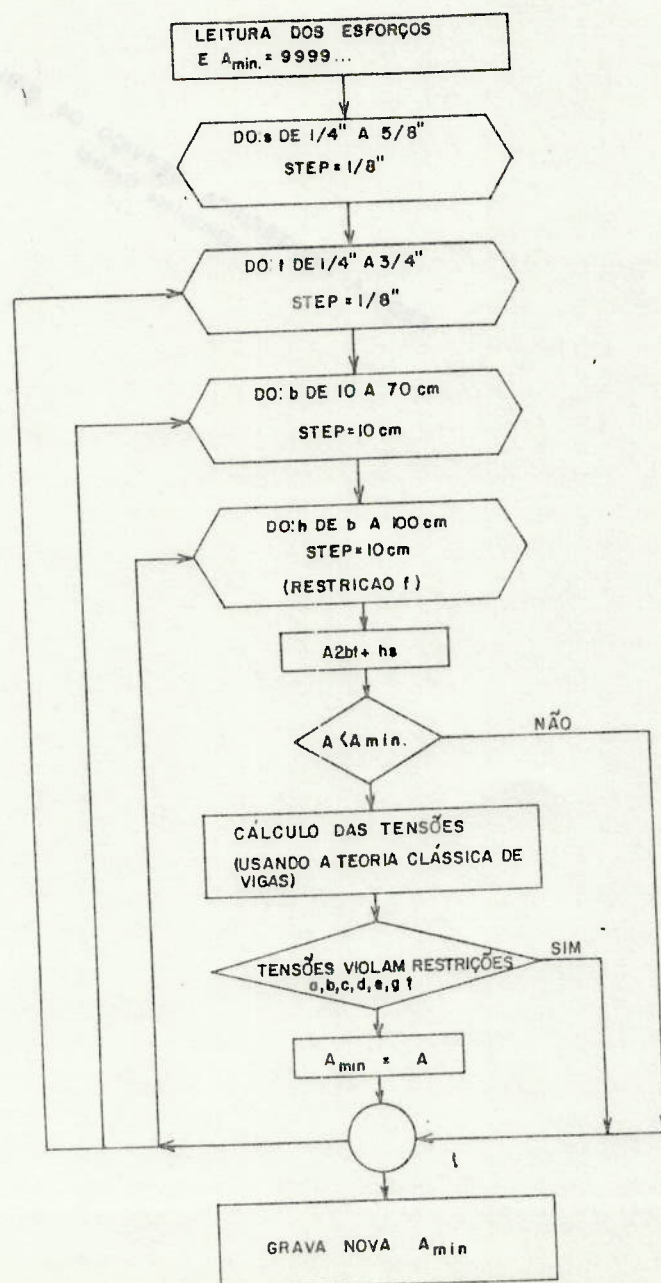
HH, BB, TT1, TT2 - dimensões do perfil otimizado

## 5.3.5 Descrição do Bloco

Conforme já justificado, este bloco usa a busca exaustiva com as variáveis de espessura com incrementos de  $1/8''$  e as de largura com incrementos de 100 mm.

Este bloco escolhe a menor área de um perfil que satisfaça todas as condições de contorno e grava num arquivo "M.T." o perfil otimizado e num arquivo "J.T." as características geométricas deste perfil chamado o bloco (d) "MC.BAS" em seguida.

## 5.3.6 Diagrama deste Bloco



## 5.4 Otimização das Colunas (d)

Este bloco é quase igual ao anterior, somente sendo acrescentada a flambagem das colunas segundo DIN4114(11), Timoshenko(13), Roark(14) e Hannover(15) para o sub-sistema da coluna.

## 5.4.1 Formulação da Flambagem da Coluna

$$LO = 0,75H \quad (36)$$

$$RO = \frac{J_Y}{\text{ÁREA}} \quad (37)$$

$$LAMB = \frac{LO}{RO} \quad (38)$$

que deve ser no máximo 150, segundo (11)

W - tabelado em (11), (13) e (14)

$$\sigma_1 = \frac{WPC}{\text{ÁREA}} + \frac{0,9 \text{ MT}}{W_Y} \leq \bar{\sigma}_1 \quad (39)$$

$$\sigma_2 = \frac{WPC}{\text{ÁREA}} + 0,9 \left( \frac{MH}{W_X} + \frac{ML}{W_Y} \right) \leq \bar{\sigma}_2 \quad (40)$$

$$\bar{\sigma}_1 = 14 \text{ KN/cm}^2 \quad (41)$$

$$\bar{\sigma}_2 = 16 \text{ KN/cm}^2 \quad (42)$$

Obs: Os esforços hiperestáticos são obtidos no bloco b ou bloco h

## 5.4.2 Variáveis do Bloco

Além das expostas no item anterior:

$L\emptyset$  - comprimento de flambagem

RO - raio de giração mínimo

LAMB - grau de esbeltez

WW - coeficiente de flambagem

PC - força de compressão na coluna

ML - momento que atua no plano da estrutura

MH - momento lateral

## 5.4.3 Listagem do bloco

```

10 'OTIMIZACAO DA COLUNA
20 '*****
30 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME D.T
40 OPEN"1",#1,"D.T"
50 INPUT#1,P$,PT$,PL$,FIV$,FIC$,L$,H$,AA$,N$
60 P=VAL(P$)
70 PT=VAL(PT$)
80 PL=VAL(PL$)
90 FIV=VAL(FIV$)
100 FIC=VAL(FIC$)
110 L=VAL(L$)
120 H1=VAL(H$)
130 AA=VAL(AA$)
140 N=VAL(N$)
150 PRINT P,L,H1,AA,N
160 CLOSE#1
170 '*****
180 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME C.T
190 OPEN"1",#2,"C.T"
200 INPUT#2,HV$,MH$,PC$,MCP$,MCL$,HG$
210 PC=VAL(PC$)
220 ML=VAL(MCP$)
230 MH=VAL(MCL$)
240 CLOSE#2
250 '*****
260 'INICIO DO LOOPING DE BUSCA DOS PERFIS
270 AREAOK=999999!
280 FOR T2=.635 TO 1.5875 STEP .3175
290 FOR T1=.635 TO 1.905 STEP .3175
300 FOR B=10 TO 70 STEP 10
310 FOR H=10 TO 80 STEP 10
320 '*****
330 'CONDICAO DE CONTORNO H)=B
340 IF B>H THEN 1120
350 '*****
360 'CONDICAO DE MINIMA AREA
370 AREA=2*B*T1+H*T2
380 IF AREA>AREAOK THEN 1120
390 '*****
400 'CONDICAO DE CONTORNO DE TENSAO DE CARREGAMENTO PRINCIPAL
410 G=AREA*.785
420 O1=(2*T1+H)/2
430 JX=B*T1^3/6+T2*H^3/12+2*B*T1*(O1-T1/2)^2
440 JY=T1*B^3/6+H*T2^3/12
450 WX=JX/O1
460 WY=JY*2/B
470 NT=FIC*ML
480 SI=NT/WY
490 IF SI>1.4 THEN 1120
500 '*****

```

```

500 *****
510 'CONDICAO DE CONTORNO DE TENSAO DE CARREGAMENTO ADICIONAL
520 SII=MH/WX+ML/WY
530 IF SII>1.6 THEN 1120
540 *****
550 L0=H1*.75
560 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DA COLUNA
570 R0=SQR(JY/AREA)
580 LAMB=L0/R0
590 IF LAMB>150 THEN 1120
600 WW=1.46875E-04*LAMB^2-.007375*LAMB+1.2
610 SIF=WW*PC/AREA+.9*MT/WY
620 IF SIF>1.4 THEN 1120
630 SIF2=WW*PC/AREA+.9*(MH/WX+ML/WY)
640 IF SIF2>1.6 THEN 1120
650 *****
660 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DA ABA
670 AL=2*H1/B
680 IF AL<=.5 THEN K=3.62
690 IF AL>.5 AND AL<=1 THEN K=1.18
700 IF AL>1 AND AL<=1.2 THEN K=.934
710 IF AL>1.2 AND AL<=1.4 THEN K=.784
720 IF AL>1.4 AND AL<=1.6 THEN K=.687
730 IF AL>1.6 AND AL<=1.8 THEN K=.622
740 IF AL>1.8 AND AL<=2 THEN K=.574
750 IF AL>2 AND AL<=2.5 THEN K=.502
760 IF AL>2.5 AND AL<=3 THEN K=.464
770 IF AL>3 AND AL<=4 THEN K=.425
780 IF AL>4 THEN K=.416
790 SKK=K*(2756*T1/B)^2/1000
800 VI=SKK/SI
810 VII=SKK/SII
820 IF VI<1.5 THEN 1120
830 IF VII<1.35 THEN 1120
840 *****
850 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM LATERAL
860 JD=(2*B*T1^3+H*T2^3)/3
870 CM=B*T1^3*(H-T1)^2/24
880 C=SQR((CM*H1^2/H^2+.039*H1^2*JD)/JY)
890 PI=3.14159
900 SKI=PI^2*2100*JY/H1^2
910 V=01
920 SIKI=1.35*SKI*(01-T1/2)/JX*(SQR((5*V/PI^2)^2+C^2)-5*V/PI^2)
930 SIGAD2=SIKI/1.5
940 SFII=MH/WX
950 IF SFII>SIGAD2 THEN 1120
960 *****
970 'CONDICAO DE CONTORNO DE FLAMBAGEM DE ALMA
980 KK=23.9
990 SAK=KK*(1378*T2/H)^2/1000
1000 VAI=SAK/SI

```



```

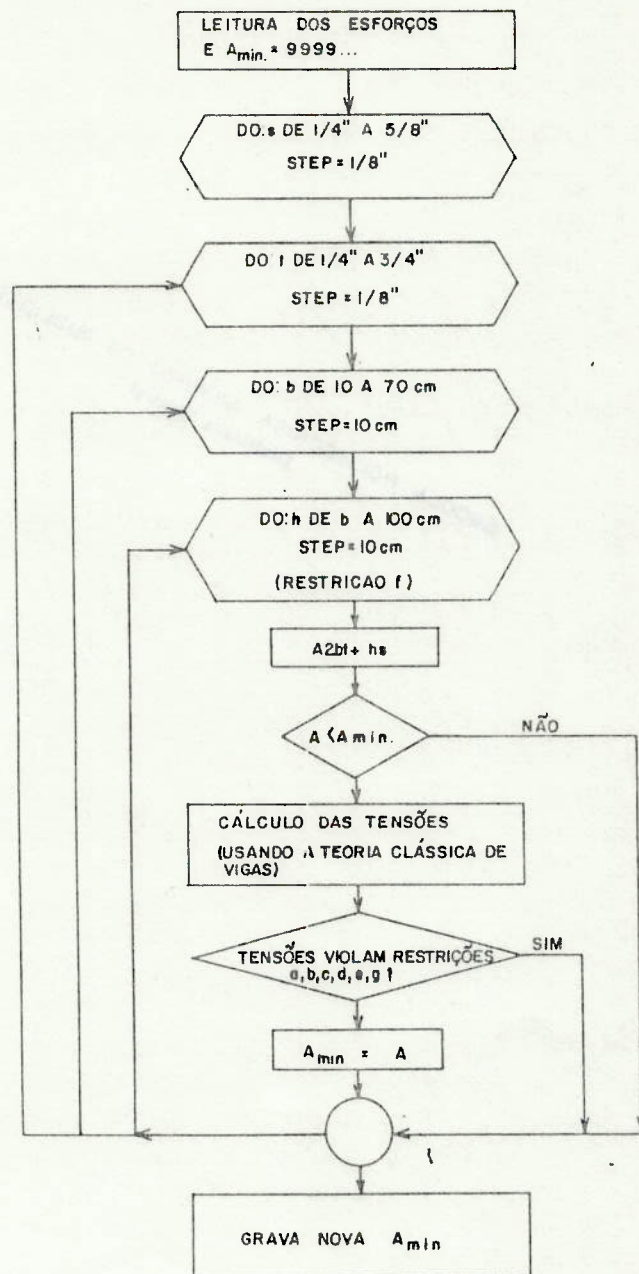
1000 VAI=SAK/SI
1010 VAII=SAK/SII
1020 IF VAI<1.35 THEN 1120
1030 IF VAII<1.25 THEN 1120
1040 '*****
1050 'FIM DO LOOPING DE BUSCA DO PERFIL
1060 AREAOK=AREA
1070 BB=B
1080 HH=H
1090 TT1=T1
1100 TT2=T2
1110 LPRINT"H=";H;"B=";B;"T1=";T1;"T2=";T2
1120 NEXT H
1130 NEXT B
1140 NEXT T1
1150 NEXT T2
1160 '*****
1170 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME M.T
1180 LPRINT"COLUNA B=";BB;"H=";HH;"T1=";TT1;"T2=";TT2
1190 H=HH
1200 B=BB
1210 T1=TT1
1220 T2=TT2
1230 H$=STR$(H)
1240 B$=STR$(B)
1250 T1$=STR$(T1)
1260 T2$=STR$(T2)
1270 OPEN"O",#1,"M.C.T"
1280 PRINT#1,H$;"",B$;"",T1$;"",T2$
1290 CLOSE#1
1300 '*****
1310 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME J1.T
1320 AREA=2*B*T1+H*T2
1330 O1=(B*T1^2/2+H*T2*(T1+H/2)+B*T1*(H+3*T1/2))/AREA
1340 JX=B*T1^3/6+T2*H^3/12
1350 JX=JX+B*T1*(O1-T1/2)^2+H*T2*(O1-T1-H/2)^2+B*T1*(O1-H-3*T1/2)^2
1360 JY=T1*B^3/6+H*T2^3/12
1370 JT=(2*B*T1^3+H*T2^3)/3
1380 PRINT"COLUNA ";AREA;JT;JX;JY
1390 AREA$=STR$(AREA)
1400 JT$=STR$(JT)
1410 JX$=STR$(JX)
1420 JY$=STR$(JY)
1430 OPEN"O",#1,"J1.T"
1440 PRINT#1,AREA$;"",JT$;"",JX$;"",JY$
1450 CLOSE#1
1460 '*****
1470 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA OK.BAS
1480 CLEAR
1490 CHAIN"OK

```

## 5.4.4 Descrição do Bloco

Este bloco funciona da mesma forma que o anterior com a gravação do perfil otimizado no arquivo "MC.T." e suas características no arquivo "J1.T." chamando o bloco seguinte "OK.BAS".

## 5.4.5 Diagrama deste Bloco



## 5.5 Verificação da Convergência (e)

Conforme anteriormente explicado, para reduzir o número de combinações possíveis e para poder utilizar a restrita capacidade de memória do microcomputador, dividimos a otimização em uma divisão, muito natural, em otimização de viga e otimização de colunas. Porém na obtenção de perfis ótimos de viga e colunas, os esforços anteriormente calculados serão modificados.

Tal modificação é pequena, pois os elementos de inércia têm uma influência muito menor nos esforços do que os elementos de geometria da estrutura. Porém esta modificação de esforços (também provocada pela posição da ponte rolante de máximos esforços) muda o ótimo. Necessitamos então aplicar ao algoritmo uma verificação de convergência.

A convergência pode ser explicada da seguinte forma:

Como os esforços de partida são para a viga e coluna escolhidas do caso isostático, eles serão sempre maiores do que os esforços hiperestáticos finais. Tais esforços resultarão em perfis (viga e colunas) maiores (maior rigidez) ou iguais aos ótimos. Ao se calcular os esforços hiperestáticos da estrutura composta por estes perfis, teremos esforços menores que os de partida. Dai, teremos três casos possíveis:

- a) Os perfis otimizados na segunda iteração são ambos ou um deles maiores (maior rigidez) do que os ótimos, o que resulta em esforços hiperestáticos menores que os de partida porém maiores do que da estrutura ótima. Se a cada iteração não cairmos no caso c tenderemos para a solução ótima.

- b) Os perfis otimizados na segunda iteração são ambos ou um deles menores (menor rigidez) do que os perfis ótimos, o que resulta em esforços hiperestáticos menores do que os de partida e menores do que da estrutura ótima. Se a cada iteração não cairmos no caso c tenderemos para a solução ótima.
- c) Seria uma conjunção dos casos anteriores onde os perfis seriam maiores ou menores (mais rígidos ou menos rígidos) em relação a iteração anterior tendendo-se para o ótimo.

Obs: Pode haver o caso em que o método ficaria oscilando entre dois conjuntos de perfis (viga e coluna). Porém neste caso, o ótimo seria um destes dois conjuntos de perfis (o mais pesado).

#### 5.5.1 Variáveis do Bloco

HV, BV, TV1, TV2 - dimensões da viga otimizada na penúltima busca

HC, BC, TC1, TC2 - dimensões da coluna otimizada na penúltima busca

H1, B1, T11, T12 - dimensões da viga otimizada na última busca

H2, B2, T21, T22 - dimensões da coluna otimizada na última busca

## 5.5.2 Listagem do Bloco

```

10 'VERIFICACAO DA CONVERGENCIA
20 '*****
30 'LEITURA DO ARQUIVO DE NONE OK.T
40 OPEN"1",#1,"OK.T"
50 INPUT#1,HV$,BV$,TV1$,TV2$,HC$,BC$,TC1$,TC2$
60 HV=VAL(HV$)
70 BV=VAL(BV$)
80 TV1=VAL(TV1$)
90 TV2=VAL(TV2$)
100 HC=VAL(HC$)
110 BC=VAL(BC$)
120 TC1=VAL(TC1$)
130 TC2=VAL(TC2$)
140 CLOSE#1
150 '*****
160 'LEITURA DO ARQUIVO DE NONE H.T
170 OPEN"1",#1,"H.T"
180 INPUT#1,H1$,B1$,T11$,T12$
190 H1=VAL(H1$)
200 B1=VAL(B1$)
210 T11=VAL(T11$)
220 T12=VAL(T12$)
230 CLOSE#1
240 '*****
250 OPEN"1",#1,"HC.T"
260 'LEITURA DO ARQUIVO DE NONE HC.T
270 INPUT#1,H2$,B2$,T21$,T22$
280 H2=VAL(H2$)
290 B2=VAL(B2$)
300 T21=VAL(T21$)
310 T22=VAL(T22$)
320 CLOSE#1
330 '*****
340 'BUSCA UTGA/COLUNA
350 IF HV=H1 AND BV=B1 AND TV1=T11 AND TV2=T12 AND HC=H2 AND BC=B2 AND TC1=T21 AND TC2=T22 THEN 470
360 '*****
370 'GRAVACAO EM ARQUIVO SEQUENCIAL DE NONE OK.T
380 OPEN"0",#1,"OK.T"
390 PRINT#1,H1$,"";B1$,"";T11$,"";T12$,"";H2$,"";B2$,"";T21$,"";T22$
400 CLOSE#1
410 '*****
420 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA T.BAS
430 CLEAR
440 CHAIN"T
450 '*****
460 'IMPRESSAO DOS RESULTADOS
470 LPRINT"OK"
480 LPRINT"VIGA H=";H1;"B=";B1;"T1=";T11;"T2=";T12
490 LPRINT
500 LPRINT"COLUNA H=";H2;"B=";B2;"T1=";T21;"T2=";T22
510 END

```

### 5.5.3 Descrição do Bloco

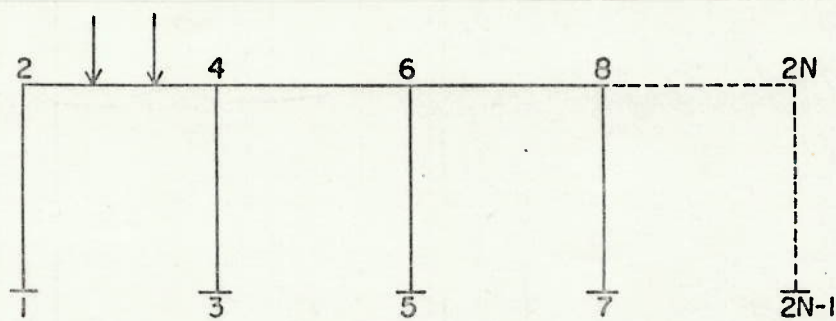
Neste bloco compara-se os resultados da nova otimização de coluna e viga, os perfis encontrados são iguais à última interação imprimindo o resultado em caso afirmativo ou registrando os perfis num arquivo "OK.T." (em substituição ao velho valor) chamando o próximo bloco "T.BAS" em caso contrário.

### 5.6 Cálculo do Carregamento Máximo na Viga (f)

Este bloco utiliza o clássico cálculo matricial de estruturas pelo método dos deslocamentos para determinar os esforços hiperestáticos da estrutura (ver, Venâncio (3), Livesley(4), Zienkiewicz(7)).

O método foi estudado de uma maneira bastante profunda para poder ampliar a capacidade do equipamento para a resolução de estruturas maiores.

Este é o bloco que é crítico na utilização da capacidade da memória central do microcomputador, ou seja, este bloco é que determina o tamanho máximo da estrutura a ser processada.



$N$  - Número de Colunas

Fig.10 - Numeração dos Nós no Cálculo Matricial

## 5.6.1 Modelagem e Formulação

A modelagem deste bloco será feita com a separação da viga em elementos que vão de uma coluna à outra vizinha, e contando com cada coluna como outro elemento. A numeração dos nós será feita com números ímpares nos inferiores e pares nos superiores, sendo que a diferença entre um nó superior e um inferior de uma coluna seja sempre de uma unidade (1) e entre dois nós superiores ou inferiores adjacentes na horizontal no máximo dois (2). Tal procedimento reduz ao mínimo a banda da matriz de rigidez otimizando a utilização da memória disponível.

Apesar de ser uma estrutura plana, trata-se de um pórtico espacial por possuir cargas perpendiculares ao plano que a contém; com seis (6) graus de liberdade por nó. A matriz de rigidez dos nós livres da estrutura completa por causa do sistema de numeração adotado, possui uma banda igual a onze (11), não importando o número de colunas dos dados de entrada. Além da simetria, esta matriz é formada sempre de três submatrizes que correspondem ao nó livre da primeira coluna, da última coluna e uma terceira submatriz igual para todos os nós intermediários e o seu tamanho é de  $(6N, 6N)$  sendo  $N$  o número de colunas.

A formulação clássica é (ver Venâncio(3), Livesley(4) e Zienkiewicz(7)).

$$[X] = [K]^{-1} [Q_0] \quad (43)$$

$$[\bar{Q}] = [\bar{K}] [\bar{X}] + [\bar{Q}_0] \quad (44)$$

$$[\bar{X}] = [T] [X] \quad (45)$$

$$[\bar{Q}_0] = [T] [Q_0] \quad (46)$$



$[X]$  = vetor deslocamentos

$[o]$  = vetor esforços internos

$[Q_o]$  = vetor esforços externos

$[K]$  = matriz de rigidez

$[T]$  = matriz de rotação

Obs: Os vetores e matrizes com barra se referem aos elementos e estão no sistema local de referência.

Seguindo a formulação, a sistemática normal de resolução seria:

- a) Calcular a matriz de rigidez de cada elemento
- b) Calcular a matriz de rotação para cada elemento
- c) Calcular o vetor esforços externos de cada elemento
- d) Calcular a matriz de rigidez dos nós livres por somatória das matrizes de rigidez de cada elemento (já no sistema geral de referência)
- e) Calcular o vetor de esforços externos no sistema geral de referência
- f) Resolver o sistema de equações e achar o vetor deslocamentos
- g) Calcular o vetor de esforços internos para cada barra

Estudando estas sete etapas, podemos notar que no caso presente podemos partir da etapa e economizando memória central do microcomputador e tempo de processamento.

Tal economia se dá pela razão de podermos definir a matriz de rigidez dos nós livres e a matriz de carregamentos externos.

Utilizaremos para a Resolução do Sistema de equações simultâneas acima o método de Cholesky de triangularização com retrosubstituição por partição, porém, utilizando-se a matriz de rigidez retangular com meia banda (5) por (6N) (N número de colunas), aproveitando-se da simetria da mesma.

Foi utilizada uma matriz auxiliar (C) para melhorar a precisão do processo (ver Venâncio (3), Livesley (4) e Zienkiewicz (7)).

Para o cálculo da posição da ponte rolante de máximo momento fletor total:

$$M(I) = \sqrt{MV^2 + MH^2} \quad (57)$$

que é uma função de quatro (4) grau em relação à posição da ponte (Y).

Como exemplo usaremos o método clássico e o reduzido para uma estrutura genérica com quatro (4) colunas.

Obs: Os Ks das matrizes estão definidos na listagem do programa da linha 590 em diante.

K21					-K2				
	K23			K24	K23				K24
		K26	K27			-K26			-K27
			K22						-K22
		-K27	K28		K27				$\frac{K28}{2}$
	K24			K25	-K24				$\frac{K25}{2}$
-K21					K21				
	-K23			-K24	K23				-K24
		-K26	K27			K26			K27
			-K22						K22
		-K27	$\frac{K28}{2}$			K27			K28
	K24			$\frac{K25}{2}$	-K24				K25

Fig.11 - Matriz de Rigidez da Viga

A seguir, temos a matriz de rigidez de elemento de barra de pórtico espacial (12 x 12) para a viga (fig.11) e para a coluna, fig. (12).

K11					-K11				
	K13			K14	-K13				K14
		K16	-K17			-K16			-K17
			K12						-K12
		-K17	K18			K17			$\frac{K18}{2}$
	K14			K15	-K14				$\frac{K15}{2}$
-K11					K11				
	-K13			-K14	K13				-K14
		-K16	K17			K16			K17
			-K12						K12
		-K17	$\frac{K18}{2}$			K17			K18
	K14			$\frac{K15}{2}$	-K14				K15

Fig.12 - Matriz de Rigidez da Coluna

Para a coluna temos a seguinte matriz de rotação (fig.13).

$$C = \cos \alpha$$

$$S = \sin \alpha$$

C	-S									
S										
		I								
			C	-S						
			S							
					I					
						C	-S			
						S				
								I		
									C	-S
									S	
										I

Fig.13 - Matriz de Rotação

Para a viga a matriz de rotação é a matriz identidade pois o sistema geral de referência coincide com o local.

A matriz de rigidez das colunas no sistema geral de referência segundo a fórmula  $[K] = [T]^T [K] [T]$  é:

K13				K14 - K13				K14
	K11				-K11			
		K16 - K17				-K16 - K17		
		-K17	K18			K17 - K18		
			K12				$\frac{K12}{2}$	
K14				K15	-K14			$\frac{K15}{2}$
-K13					K13			K14
	-K11			-K14	K11			
		-K16	K17			K16 - K17		
		-K17	-K18			-K17	K18	
			$\frac{K12}{2}$					K12
K14				$\frac{K15}{2}$	K14			K15

Fig.14 - Matriz de Rigidez das Colunas no Sistema Geral de Referência

Somando de maneira conveniente, a matriz de rigidez dos nós livres da estrutura é:



K13					+K14	-K21			
K21									
K11				K24		-K23			
K23									
K16	-K17	-K27				-K26	-K27		
K26									
K18						-K22			
K22									
K12				K27		$\frac{K28}{2}$			
K28									
K15		-K24				$\frac{K25}{2}$			
K25									
K13					+K14	-K21			
2K21									
K11						-K23			K24
2K23									
K16	-K17					-K26	-K27		
2K26									
K18						-K22			
2K22									
K12				K27		$\frac{K28}{2}$			
2K28									
K15		-K24				$\frac{K25}{2}$			
2K25									
K13					+K14	-K21			
2K21									
K11						-K23			K24
2K23									
K16	-K17					-K26	-K27		
2K26									
K18						-K22			
2K22									
K12				K27		$\frac{K28}{2}$			
2K28									
K15		-K24				$\frac{K25}{2}$			
2K25									
K13					+K14	-K21			
K21									
K11						-K23			K24
K23									
K16	-K17					-K26	-K27		
K26									
K18						-K22			
K22									
K12				K27		$\frac{K28}{2}$			
K28									
K15		-K24				$\frac{K25}{2}$			
K25									
K13					+K14	-K21			
K21									
K11						-K23			K24
K23									
K16	-K17	K27				-K26	-K27		
K26									
K18						-K22			
K22									
K12				K27		$\frac{K28}{2}$			
K28									
K15		-K24				$\frac{K25}{2}$			
K25									

Fig.16 - Matriz de Rigidez dos Nós Livres  
da Estrutura (semi banda)

O vetor de carregamentos externos é:

P1
P2
P3
P4
P5
P6
P7
P8
P9
P10
P11
P12



Estudando-se estas duas últimas matrizes, podemos notar que facilmente podemos gerá-las sem os passos anteriores. Daqui para adiante, temos somente que resolver o sistema de equações achando-se a matriz de deslocamento e, em seguida, a matriz de esforços hiperestáticos segundo as fórmulas já apresentadas.

Para N matrizes, teremos as mesmas matrizes só que ampliadas para um comprimento de  $(6N)$ .

Para determinarmos os coeficientes desta função, precisamos de quatro valores de momento máximo para a posição da ponte rolante e adotamos, no caso  $(L/5)$  (um quinto da distância entre colunas), para o primeiro, com um incremento de 30 cm para os demais. Resultando disto, a posição de máximo esforço externo e os máximos momentos (vertical e horizontal).

Obs.: Trabalharemos com precisão dupla pois, segundo Souza Lima (1), isto elimina qualquer problema de precisão de resultados.

#### 5.6.2 Observações a respeito do vetor $(Q_0)$

O vetor de esforços externos  $(Q_0)$  leva em conta tanto as reações máximas por roda como as forças longitudinais e o peso próprio da estrutura. Quanto ao carregamento das reações máximas por roda existe, neste bloco, uma rotina capaz de determinar a posição de máximo esforço interno em relação ao posicionamento da ponte (conforme já descrito).

### 5.6.3 Verificação da Linearidade Geométrica

Este bloco leva em conta a linearidade geométrica segundo Souza Lima(1) e Venâncio(2)

$$\epsilon \leq 0,001 \quad (58)$$

$$\theta \leq 0,001 \text{ rad} \quad (59)$$

$\epsilon$  : deformação

$\theta$  : rotação

Tal consideração se torna necessária na medida em que os membros possuem esforços normais em conjugação com esforços transversais. Se porém admitirmos pequenas deformações como as acima apresentadas por (1) e (2), podemos desprezar os efeitos de segunda ordem, ou seja, podemos admitir a superposição de esforços.

### 5.6.4 Variáveis do Bloco f

A1 - área da coluna

T1 - momento de inércia à torção da coluna

AI12 - momento de inércia em relação ao eixo horizontal principal

AI11 - momento de inércia em relação ao eixo vertical principal

A2, T2, AI21, AI22 - idem para a viga

Y - distância da última coluna à primeira roda da ponte rolante

AS(I, J) - matriz de rigidez da estrutura

PP(I), P(I) - vetores carregamento externo

PC(I) - após o processamento é o vetor deslocamentos

SA(I, J) - matriz de rigidez do elemento tipo viga no sistema local de referência

F(I) - vetor deslocamentos no sistema global de referência

C(I) - matriz auxiliar do método Cholesky para melhorar a precisão

M(I) - vetor dos momentos em função de cada posição da ponte para a maximização

YY(I) - vetor das posições da ponte para obter M(I)

K(I, J) - matriz dos coeficientes da maximização

AK11, AK12, AK13, AK14, AK15, AK16, AK17, AK18, AK21, AK22, AK23, AK24, AK25, AK26, AK27, AK28 - elementos das submatrizes de rigidez segundo (3) e (4).

XX1 - posição da ponte de máximo momento

MAX - momento fletor máximo para a posição XX1

MV - momento fletor vertical

MH - momento fletor horizontal

## 5.6.5 Listagem do Bloco

```

10 'CALCULO DO CARREGAMENTO MAXIMO DA VIGA
20 DEFDBL A-H,L-Z
30 OPTION BASE 1
40 '*****
50 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME D.T
60 OPEN"1",#1,"D.T"
70 INPUT#1,P$,PTS,PL$,FIV$,FICS$,L$,H$,AA$,N$
80 P=VAL(P$)
90 PT=VAL(PTS)
100 PL=VAL(PL$)
110 FIV=VAL(FIV$)
120 FIC=VAL(FICS$)
130 L=VAL(L$)
140 H=VAL(H$)
150 AA=VAL(AA$)
160 N=VAL(N$)
170 PRINT P,PT,PL,FIV,FIC,L,H,AA,N
180 CLOSE#1
190 '*****
200 'ABERTURA DO ARQUIVO DE NOME J.T
210 OPEN"1",#1,"J.T"
220 INPUT#1,AREA$,JTS$,JXS$,JYS$
230 A2=VAL(AREA$)
240 T2=VAL(JTS$)
250 AI21=VAL(JXS$)
260 AI22=VAL(JYS$)
270 CLOSE#1
280 '*****
290 'ABERTURA DO ARQUIVO DE NOME J1.T
300 OPEN"1",#1,"J1.T"
310 INPUT#1,AREA$,JTS$,JXS$,JYS$
320 A1=VAL(AREA$)
330 T1=VAL(JTS$)
340 AI12=VAL(JXS$)
350 AI11=VAL(JYS$)
360 CLOSE#1
370 Y=INT(L/5)
380 N=6*N
390 DIM AS(N,11),P(N),SA(12,12),F(12),C(11),PP(12),M(5),YY(5),K(4,4)
400 '*****
410 'INICIO DO LOOPING DO MAXIMO MOMENTO
420 FOR III=1 TO 4
430 IF XXX=100 THEN Y=INT(XX1)
440 '*****
450 'ZERAGEM DAS MATRIZES
460 FOR I=1 TO 11
470 C(I)=0
480 NEXT I
490 FOR I=1 TO N
500 FOR J=1 TO 11

```

```
500 FOR J=1 TO 11
510 AS(I,J)=0
520 NEXT J
530 NEXT I
540 FOR I=1 TO N
550 P(I)=0
560 NEXT I
570 '*****
580 'MONTAGEN DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA ESTRUTURA
590 AK11=2100*AI/H
600 AK12=800*T1/H
610 AK13=25200*AI11/(H^3)
620 AK14=12600*AI11/(H^2)
630 AK15=8400*AI11/H
640 AK16=25200*AI12/(H^3)
650 AK17=12600*AI12/(H^2)
660 AK18=8400*AI12/H
670 AK21=2100*A2/L
680 AK22=800*T2/L
690 AK23=25200*AI21/(L^3)
700 AK24=12600*AI21/(L^2)
710 AK25=8400*AI21/L
720 AK26=25200*AI22/(L^3)
730 AK27=12600*AI22/(L^2)
740 AK28=8400*AI22/L
750 A=7
760 B=1
770 C=N-11
780 D=2*AK21+AK13
790 GOSUB 1820
800 A=8
810 B=1
820 C=N-10
830 D=2*AK23+AK11
840 GOSUB 1820
850 A=9
860 B=1
870 C=N-9
880 D=2*AK26+AK16
890 GOSUB 1820
900 A=10
910 B=1
920 C=N-8
930 D=2*AK22+AK18
940 GOSUB 1820
950 A=11
960 B=1
970 C=N-7
980 D=2*AK28+AK12
990 GOSUB 1820
1000 A=12
```

1000 A=12  
1010 B=1  
1020 C=N-6  
1030 D=2\*AK25+AK15  
1040 GOSUB 1820  
1050 A=3  
1060 B=2  
1070 C=N-3  
1080 D=-AK17  
1090 GOSUB 1820  
1100 A=6  
1110 B=3  
1120 C=N-6  
1130 D=-AK24  
1140 GOSUB 1820  
1150 A=5  
1160 B=5  
1170 C=N-7  
1180 D=AK27  
1190 GOSUB 1820  
1200 A=1  
1210 B=6  
1220 C=N-5  
1230 D=AK14  
1240 GOSUB 1820  
1250 A=1  
1260 B=7  
1270 C=N-11  
1280 D=-AK21  
1290 GOSUB 1820  
1300 A=2  
1310 B=7  
1320 C=N-10  
1330 D=-AK23  
1340 GOSUB 1820  
1350 A=3  
1360 B=7  
1370 C=N-9  
1380 D=-AK26  
1390 GOSUB 1820  
1400 A=4  
1410 B=7  
1420 C=N-8  
1430 D=-AK22  
1440 GOSUB 1820  
1450 A=5  
1460 B=7  
1470 C=N-7  
1480 D=AK28/2  
1490 GOSUB 1820  
1500 A=6

```
1500 A=6
1510 B=7
1520 C=N-6
1530 D=AK25/2
1540 GOSUB 1820
1550 H=3
1560 B=9
1570 C=N-9
1580 D=-AK27
1590 GOSUB 1820
1600 A=2
1610 B=11
1620 C=N-10
1630 D=AK24
1640 GOSUB 1820
1650 AS(1,1)=AK13+AK21
1660 AS(N-5,1)=AK13+AK21
1670 AS(2,1)=AK11+AK23
1680 AS(N-4,1)=AK11+AK23
1690 AS(3,1)=AK16+AK26
1700 AS(N-3,1)=AK16+AK26
1710 AS(4,1)=AK18+AK22
1720 AS(N-2,1)=AK18+AK22
1730 AS(5,1)=AK12+AK28
1740 AS(N-1,1)=AK12+AK28
1750 AS(6,1)=AK15+AK25
1760 AS(N,1)=AK15+AK25
1770 AS(3,3)=-AK27
1780 AS(N-3,3)=AK27
1790 AS(2,5)=AK24
1800 AS(N-4,5)=-AK24
1810 GOTO 1890
1820 FOR I=A TO C STEP 6
1830 J=B
1840 AS(I,J)=D
1850 NEXT I
1860 RETURN
1870 '*****
1880 'MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA VIGA
1890 FOR I=1 TO 12
1900 FOR J=1 TO 12
1910 SA(I,J)=0
1920 NEXT J
1930 NEXT I
1940 SA(1,1)=AK21
1950 SA(2,2)=AK23
1960 SA(3,3)=AK26
1970 SA(4,4)=AK22
1980 SA(5,5)=AK28
1990 SA(6,6)=AK25
2000 SA(2,6)=AK24
```

```

2000 SA(2,6)=AK24
2010 SA(3,5)=-AK27
2020 SA(5,3)=-AK27
2030 SA(6,2)=AK24
2040 SA(1,7)=-AK21
2050 SA(2,8)=-AK23
2060 SA(3,9)=-AK26
2070 SA(4,10)=-AK22
2080 SA(5,11)=AK28/2
2090 SA(6,12)=AK25/2
2100 SA(2,12)=AK24
2110 SA(3,11)=-AK27
2120 SA(5,9)=AK27
2130 SA(6,8)=-AK24
2140 SA(7,1)=-AK21
2150 SA(8,2)=-AK23
2160 SA(9,3)=-AK26
2170 SA(10,4)=-AK22
2180 SA(11,5)=AK28/2
2190 SA(12,6)=AK25/2
2200 SA(12,2)=AK24
2210 SA(11,3)=-AK27
2220 SA(9,5)=AK27
2230 SA(8,6)=-AK24
2240 SA(7,7)=AK21
2250 SA(8,8)=AK23
2260 SA(9,9)=AK26
2270 SA(10,10)=AK22
2280 SA(11,11)=AK28
2290 SA(12,12)=AK25
2300 SA(8,12)=-AK24
2310 SA(9,11)=AK27
2320 SA(11,9)=AK27
2330 SA(12,8)=-AK24
2340 '*****
2350 'MONTAGEM DA MATRIZ DE CARREGAMENTOS
2360 FOR I=1 TO N
2370 P(I)=0
2380 NEXT I
2390 P(1)=PL*Y/L
2400 P(2)=-P*(L-Y)^2*(L+2*Y)/(L^3)-P*(L-Y-AA)^2*(L+2*(Y+AA))/(L^3)
2410 P(3)=-PT*(L-Y)^2*(L+2*Y)/(L^3)-PT*(L-Y-AA)^2*(L+2*(Y+AA))/(L^3)
2420 P(4)=0
2430 P(5)=PT*Y*(L-Y)^2/(L^2)+PT*(Y+AA)*(L-Y-AA)^2/(L^2)
2440 P(6)=-P*Y*(L-Y)^2/(L^2)-P*(Y+AA)*(L-Y-AA)^2/(L^2)
2450 P(7)=PL*(L-Y)/L
2460 P(8)=-P*Y^2*(L+2*(L-Y))/(L^3)-P*(Y+AA)^2*(L+2*(L-Y-AA))/(L^3)
2470 P(9)=-PT*Y^2*(L+2*(L-Y))/(L^3)-PT*(Y+AA)^2*(L+2*(L-Y-AA))/(L^3)
2480 P(10)=0
2490 P(11)=-PT*(L-Y)*Y^2/(L^2)-PT*(L-Y-AA)*(Y+AA)^2/(L^2)
2500 P(12)=P*(L-Y)*Y^2/(L^2)+P*(L-Y-AA)*(Y+AA)^2/(L^2)

```



```

2500 P(12)=P*(L-Y)*Y^2/(L^2)+P*(L-Y-AA)*(Y+AA)^2/(L^2)
2510 FOR I=1 TO 12
2520 PP(I)=P(I)
2530 NEXT I
2540 '*****
2550 'RESOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES
2560 FOR I=1 TO N
2570 P(I)=P(I)/AS(I,1)
2580 IF I=N THEN 2740
2590 FOR J=2 TO 11
2600 C(J)=AS(I,J)
2610 AS(I,J)=C(J)/AS(I,1)
2620 NEXT J
2630 FOR J1=2 TO 11
2640 J2=I+J1-1
2650 IF N(J2) THEN 2720
2660 J=0
2670 FOR J3=J1 TO 11
2680 J=J+1
2690 AS(J2,J)=AS(J2,J)-C(J1)*AS(I,J3)
2700 NEXT J3
2710 P(J2)=P(J2)-C(J1)*P(I)
2720 NEXT J1
2730 NEXT I
2740 I=I-1
2750 IF I=0 THEN 2820
2760 FOR J=2 TO 11
2770 J1=I+J-1
2780 IF N(J1) THEN 2800
2790 P(I)=P(I)-AS(I,J)*P(J1)
2800 NEXT J
2810 GOTO 2740
2820 REM
2830 FOR I=1 TO 12
2840 F(I)=0
2850 FOR K=1 TO 12
2860 F(I)=F(I)+SA(I,K)*P(K)
2870 NEXT K
2880 NEXT I
2890 PRINT
2900 MV=(F(2)-PP(2))*Y-(F(6)-PP(6))
2910 MH=(F(3)-PP(3))*Y-(F(5)-PP(5))
2920 N(III)=SQR(MV^2+MH^2)
2930 LPRINT"SS";MV;MH;Y
2940 PRINT N(III)
2950 YY(III)=Y
2960 BEEP 20,100
2970 Y=Y+30
2980 IF XXX=100 THEN GOTO 3530
2990 '*****
3000 'TERMINO DO LOOPING DO MAXIMO MOMENTO

```

```

3000 'TERMINO DO LOOPING DO MAXIMO MOMENTO
3010 NEXT III
3020 FOR I=1 TO 4
3030 PRINT"M=";M(I)"Y=";YY(I)
3040 NEXT I
3050 '*****
3060 'MONTAGEM E RESOLUCAO DO POLINOMIO DE MAXIMO MOMENTO
3070 K(1,1)=YY(1)^3
3080 K(1,2)=YY(1)^2
3090 K(1,3)=YY(1)
3100 K(1,4)=1
3110 K(2,1)=YY(2)^3
3120 K(2,2)=YY(2)^2
3130 K(2,3)=YY(2)
3140 K(2,4)=1
3150 K(3,1)=YY(3)^3
3160 K(3,2)=YY(3)^2
3170 K(3,3)=YY(3)
3180 K(3,4)=1
3190 K(4,1)=YY(4)^3
3200 K(4,2)=YY(4)^2
3210 K(4,3)=YY(4)
3220 K(4,4)=1
3230 M1=3
3240 FOR I=1 TO 3
3250 IL=I+1
3260 FOR J=IL TO 4
3270 IF K(J,I)=0 THEN 3330
3280 R1=K(J,I)/K(I,I)
3290 FOR K=IL TO 4
3300 K(J,K)=K(J,K)-K(I,K)*R1
3310 NEXT K
3320 M(J)=M(J)-M(I)*R1
3330 REN
3340 NEXT J
3350 NEXT I
3360 M(4)=M(4)/K(4,4)
3370 FOR I=1 TO 3
3380 K=4-I
3390 IL=K+1
3400 FOR J=IL TO 4
3410 M(K)=M(K)-M(J)*K(K,J)
3420 NEXT J
3430 M(K)=M(K)/K(K,K)
3440 NEXT I
3450 A=3*M(1)
3460 B=2*M(2)
3470 C=M(3)
3480 XX1=(-B-SQR(B^2-4*A*C))/2/A
3490 MAX=M(1)*XX1^3+M(2)*XX1^2+M(3)*XX1+M(4)
3500 PRINT"MAX": MAX;"YMAX":XX1

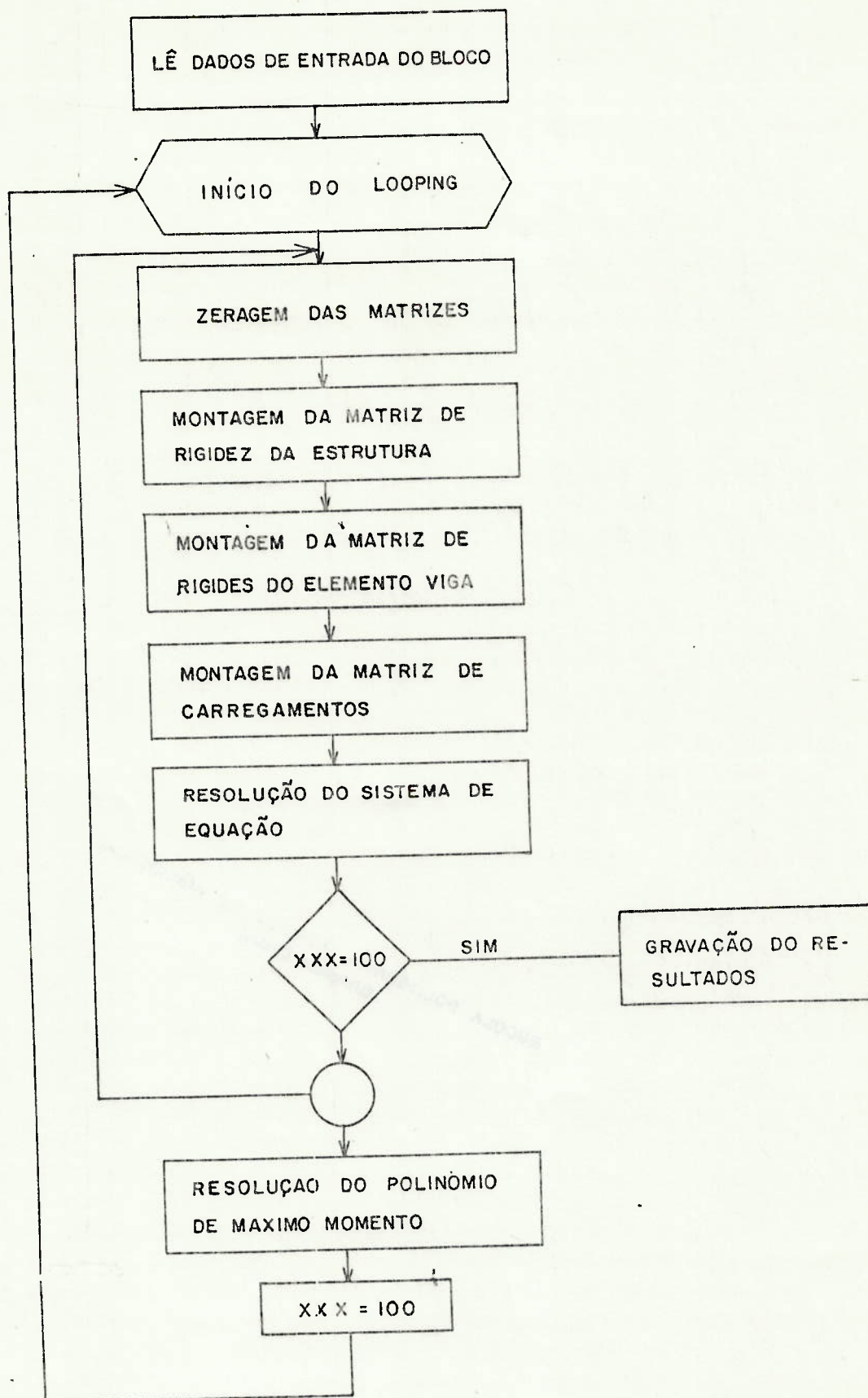
```

```
3500 PRINT"MAX"; MAX;"YMAX";XX1
3510 XXX=100
3520 GOTO 430
3530 PRINT"XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX"
3540 PRINT.
3550 PRINT
3560 PRINT"Y=";XX1;"MV=";MV
3570 PRINT"MH=";MH
3580 '*****
3590 'GRAVACAO DE ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME T.T
3600 Y$=STR$(XX1)
3610 MV$=STR$(MV)
3620 MH$=STR$(MH)
3630 OPEN"O",#3,"T.T"
3640 PRINT#3,Y$;" ";MV$;" ";MH$
3650 CLOSE#3
3660 '*****
3670 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA TG.BAS
3680 CLEAR
3690 CHAIN"TG"
```

#### 5.6.6 Descrição do Bloco

O bloco inicia com um "looping" de cálculo do máximo momento fletor em quatro (4) passagens, para definir as constantes da função de maximização do momento em função da posição da ponte.

Dentro deste "looping" temos a zeragem de todas as matrizes, a montagem da matriz de rigidez da estrutura, a montagem da matriz de rigidez do elemento viga, a montagem da matriz de carregamentos e a Resolução do Sistema de equações. Após o término do looping monta-se o polinômio de máximo momento e após a sua solução obtem-se a posição da ponte rolante de máximo esforço externo. De posse deste valor calcula-se, por mais uma só passada pelo bloco do "looping", os momentos (horizontal e vertical), que são gravados no arquivo "T.T." e ao final chama o bloco "TG.BAS".



## 5.7 Cálculo do Carregamento do Peso Próprio (g)

Como o bloco anterior, este bloco utiliza-se das mesmas técnicas para o cálculo do momento devido ao peso próprio da viga.

A separação deste do anterior é justificável pela razão de necessitarmos da posição de máximo momento, para o cálculo do momento devido ao peso próprio nesta posição, e de que neste bloco podemos utilizar um pórtico plano neste cálculo.

Todas as considerações feitas no bloco anterior, aqui são válidas para uma matriz de rigidez de banda igual a cinco (5) e comprimento de três vezes o número de colunas (3N).

### 5.7.1 Formulação

É igual à do bloco anterior

## 5.7.2 Listagem do Bloco

```

10 'CALCULO DO CARREGAMENTO DE PESO PROPRIO
20 DEFDBL A-H,L-Z
30 OPTION BASE 1
40 '*****
50 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME D.T
60 OPEN"1",#1,"D.T"
70 INPUT#1,P$,PT$,PL$,FIV$,FICS$,L$,H$,AA$,N$
80 L=VAL(L$)
90 H=VAL(H$)
100 N=VAL(N$)
110 PRINT P,L,H,AA,N
120 CLOSE#1
130 '*****
140 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME J.T
150 OPEN"1",#1,"J.T"
160 INPUT#1,AREA$,JTS$,JXS$,JYS
170 A1=VAL(AREA$)
180 A11=VAL(JXS$)
190 CLOSE#1
200 '*****
210 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME J1.T
220 OPEN"1",#1,"J1.T"
230 INPUT#1,AREA$,JTS$,JXS$,JYS
240 A2=VAL(AREA$)
250 A12=VAL(JYS)
260 CLOSE#1
270 '*****
280 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME T.T
290 OPEN"1",#1,"T.T"
300 INPUT#1,Y$,MV$,MH$
310 Y=VAL(Y$)
320 MV=VAL(MV$)
330 MH=VAL(MH$)
340 CLOSE#1
350 Y=INT(Y)
360 N=.785*A1/100000!
370 N=3*N
380 DIM AS(N,5),P(N),SA(6,6),F(6),C(5),PP(N)
390 '*****
400 'ZERAGEM DAS MATRIZES
410 FOR I=1 TO 5
420 C(I)=0
430 NEXT I
440 FOR I=1 TO N
450 P(I)=0
460 NEXT I
470 FOR I=1 TO N
480 FOR J=1 TO 5
490 AS(I,J)=0
500 NEXT J,I

```

```
500 NEXT J,I
510 '*****
520 'MONTRAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA ESTRUTURA
530 AK11=2100*AI1/L
540 AK12=25200*AI1/L^3
550 AK13=12600*AI1/L^2
560 AK14=8400*AI1/L
570 AK21=2100*A2/H
580 AK22=25200*AI2/H^3
590 AK23=12600*AI2/H^2
600 AK24=8400*AI2/H
610 A=4
620 B=1
630 C=N-5
640 D=2*AK11+AK22
650 GOSUB 1150
660 A=5
670 B=1
680 C=N-4
690 D=2*AK12+AK21
700 GOSUB 1150
710 A=6
720 B=1
730 C=N-3
740 D=2*AK14+AK24
750 GOSUB 1150
760 A=1
770 B=3
780 C=N-2
790 D=AK23
800 GOSUB 1150
810 A=3
820 B=3
830 C=N-3
840 D=-AK13
850 GOSUB 1150
860 A=1
870 B=4
880 C=N-5
890 D=-AK11
900 GOSUB 1150
910 A=2
920 B=4
930 C=N-4
940 D=-AK12
950 GOSUB 1150
960 A=3
970 B=4
980 C=N-3
990 D=AK14/2
1000 GOSUB 1150
```



```
1000 GOSUB 1150
1010 A=2
1020 B=5
1030 C=N-4
1040 D=AK13
1050 GOSUB 1150
1060 AS(1,1)=AK11+AK22
1070 AS(2,1)=AK12+AK21
1080 AS(3,1)=AK14+AK24
1090 AS(N-2,1)=AK11+AK22
1100 AS(N-1,1)=AK12+AK21
1110 AS(N,1)=AK14+AK24
1120 AS(2,2)=AK13
1130 AS(N-1,2)=-AK13
1140 GOTO 1220
1150 FOR I=A TO C STEP 3
1160 J=B
1170 AS(I,J)=D
1180 NEXT I
1190 RETURN
1200 '*****
1210 'MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA VIGA
1220 FOR I=1 TO 6
1230 FOR J=1 TO 6
1240 SA(I,J)=0
1250 NEXT J
1260 NEXT I
1270 SA(1,1)=AK11
1280 SA(4,4)=AK11
1290 SA(1,4)=-AK11
1300 SA(4,1)=-AK11
1310 SA(2,2)=AK12
1320 SA(5,5)=AK12
1330 SA(2,5)=-AK12
1340 SA(5,2)=-AK12
1350 SA(3,3)=AK14
1360 SA(6,6)=AK14
1370 SA(3,6)=AK14/2
1380 SA(6,3)=AK14/2
1390 SA(2,3)=AK13
1400 SA(3,2)=AK13
1410 SA(2,6)=AK13
1420 SA(6,2)=AK13
1430 SA(3,5)=-AK13
1440 SA(5,3)=-AK13
1450 SA(5,6)=-AK13
1460 SA(6,5)=-AK13
1470 '*****
1480 'MONTAGEM DA MATRIZ DE CARREGAMENTOS
1490 P(3)=-W*L^2/12
1500 P(N)=W*L^2/12
```

```

1500 P(N)=W*L^2/12
1510 P(2)=-W*L/2
1520 P(N-1)=-W*L/2
1530 FOR I=5 TO N-4 STEP 3
1540 P(I)=-W*L
1550 NEXT I
1560 PP(2)=P(2)
1570 PP(3)=P(3)
1580 '*****
1590 'RESOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES
1600 FOR I=1 TO N
1610 P(I)=P(I)/AS(I,1)
1620 IF I=N THEN 1780
1630 FOR J=2 TO 5
1640 C(J)=AS(I,J)
1650 AS(I,J)=C(J)/AS(I,1)
1660 NEXT J
1670 FOR J1=2 TO 5
1680 J2=I+J1-1
1690 IF N<J2 THEN 1760
1700 J=0
1710 FOR J3=J1 TO 5
1720 J=J+1
1730 AS(J2,J)=AS(J2,J)-C(J1)*AS(I,J3)
1740 NEXT J3
1750 P(J2)=P(J2)-C(J1)*P(I)
1760 NEXT J1
1770 NEXT I
1780 I=I-1
1790 IF I=0 THEN 1860
1800 FOR J=2 TO 5
1810 J1=I+J-1
1820 IF N<J1 THEN 1840
1830 P(I)=P(I)-AS(I,J)*P(J1)
1840 NEXT J
1850 GOTO 1780
1860 FOR I=1 TO 6
1870 F(I)=0
1880 FOR K=1 TO 6
1890 F(I)=F(I)+SA(I,K)*P(K)
1900 NEXT K
1910 NEXT I
1920 MG=(F(2)-PP(2))*Y-(F(3)-PP(3))-U*Y^2/2
1930 '*****
1940 'GRAVACAO DE ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME TG.T
1950 LPRINT"MG=";MG
1960 MG%=STR$(MG)
1970 MV%=STR$(MV)
1980 MH%=STR$(MH)
1990 OPEN"O",#1,"TG.T"
2000 PRINT#1,MV%,"";MH%,"";MG%

```

2000 PRINT#1,MV5;"":MH3;"":MG5

2010 CLEAR

2020 \*\*\*\*\*

2030 ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA TC.BAS

2040 CLOSE#1

2050 CHAIN"TC

### 5.7.3 Variáveis do Bloco

Além das mesmas do bloco anterior

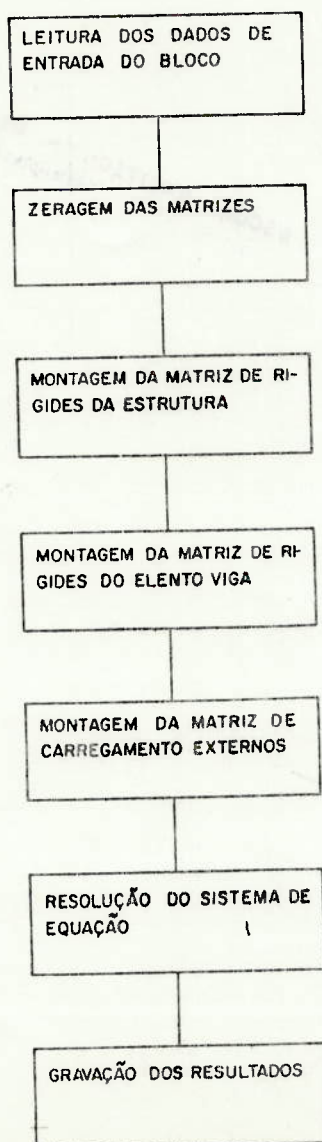
W - peso linear da viga

MG - momento devido ao peso próprio sob a primeira roda da ponte

### 5.7.4 Descrição do Bloco

Utilizando-se dos resultados do bloco anterior, calcula o momento (MG) e grava no arquivo de nome "TG.T." e chama o bloco de nome "TC.BAS".

### 5.7.5 Diagrama deste Bloco



## 5.8 Cálculo do Carregamento Máximo nas Colunas (h)

Ao contrário dos dois blocos anteriores em que a posição de máximo carregamento da ponte rolante variava com os dados de entrada, este bloco já parte de que a posição da ponte que provoca o máximo carregamento nas colunas é a da roda que possui a motorização e a frenagem (em consequência a força longitudinal) está em cima da coluna extrema da estrutura.

Novamente todas as considerações dos blocos anteriores - aqui são válidas, sendo que como temos novamente cargas perpendiculares ao plano da estrutura, teremos um tratamento de pórtico espacial.

### 5.8.1 Formulação

É igual aos dois blocos anteriores

### 5.8.2 Listagem do Bloco

```

10 'CALCULO DO CARREGAMENTO DA COLUNA
20 DEFDBL A-H,L-Z
30 OPTION BASE 1
40 '*****
50 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME D.T
60 OPEN"1",#1,"D.T"
70 INPUT#1,P%,PT%,PL%,FIV%,FIC%,LS,H%,AAS,N%
80 P=VAL(P%)
90 PT=VAL(PT%)
100 PL=VAL(PL%)
110 L=VAL(L%)
120 H=VAL(H%)
130 AA=VAL(AAS)
140 N=VAL(N%)
150 PRINT P,L,H,AA,N
160 CLOSE#1
170 '*****
180 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME J.T
190 OPEN"1",#2,"J.T"
200 INPUT#2,AREAS,JTS,JXS,JYS
210 A2=VAL(AREAS)
220 T2=VAL(JTS)
230 AI21=VAL(JXS)
240 AI22=VAL(JYS)
250 CLOSE#2
260 '*****
270 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME J1.T
280 OPEN"1",#3,"J1.T"
290 INPUT#3,AREAS,JTS,JXS,JYS
300 A1=VAL(AREAS)
310 T1=VAL(JTS)
320 AI11=VAL(JYS)
330 AI12=VAL(JXS)
340 CLOSE#3
350 '*****
360 'LEITURA DO ARQUIVO DE NOME TG.T
370 OPEN"1",#3,"TG.T"
380 INPUT#3,MVS,MHS,MGS
390 MV=VAL(MV%)
400 MH=VAL(MH%)
410 MG=VAL(MG%)
420 CLOSE#3
430 W=.785*A2/100000!
440 N=6*N
450 DIM AS(N,11),P(N),SA(12,12),F(12),C(11),PP(12),PPP(12)
460 '*****
470 'ZERAGEM DAS MATRIZES
480 FOR I=1 TO 11
490 C(I)=0
500 NEXT I

```

```
500 NEXT I
510 FOR I=1 TO N
520 FOR J=1 TO 11
530 AS(I,J)=0
540 NEXT J
550 NEXT I
560 FOR I=1 TO N
570 P(I)=0
580 NEXT I
590 *****
600 'MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA ESTRUTURA
610 AK11=2100*A1/H
620 AK12=800*T1/H
630 AK13=25200*AI11/(H^3)
640 AK14=12600*AI11/(H^2)
650 AK15=8400*AI11/H
660 AK16=25200*AI12/(H^3)
670 AK17=12600*AI12/(H^2)
680 AK18=8400*AI12/H
690 AK21=2100*A2/L
700 AK22=800*T2/L
710 AK23=25200*AI21/(L^3)
720 AK24=12600*AI21/(L^2)
730 AK25=8400*AI21/L
740 AK26=25200*AI22/(L^3)
750 AK27=12600*AI22/(L^2)
760 AK28=8400*AI22/L
770 A=7
780 B=1
790 C=N-11
800 D=2*AK21+AK13
810 GOSUB 1840
820 A=8
830 B=1
840 C=N-10
850 D=2*AK23+AK11
860 GOSUB 1840
870 A=9
880 B=1
890 C=N-9
900 D=2*AK26+AK16
910 GOSUB 1840
920 A=10
930 B=1
940 C=N-8
950 D=2*AK22+AK18
960 GOSUB 1840
970 A=11
980 B=1
990 C=N-7
1000 D=2*AK28+AK12
```

```
1000 D=2*AK28+AK12
1010 GOSUB 1840
1020 A=12
1030 B=1
1040 C=N-6
1050 D=2*AK25+AK15
1060 GOSUB 1840
1070 A=3
1080 B=2
1090 C=N-3
1100 D=-AK17
1110 GOSUB 1840
1120 A=6
1130 B=3
1140 C=N-6
1150 D=-AK24
1160 GOSUB 1840
1170 A=5
1180 B=5
1190 C=N-7
1200 D=AK27
1210 GOSUB 1840
1220 A=1
1230 B=6
1240 C=N-5
1250 D=AK14
1260 GOSUB 1840
1270 A=1
1280 B=7
1290 C=N-11
1300 D=-AK21
1310 GOSUB 1840
1320 A=2
1330 B=7
1340 C=N-10
1350 D=-AK23
1360 GOSUB 1840
1370 A=3
1380 B=7
1390 C=N-9
1400 D=-AK26
1410 GOSUB 1840
1420 A=4
1430 B=7
1440 C=N-8
1450 D=-AK22
1460 GOSUB 1840
1470 A=5
1480 B=7
1490 C=N-7
1500 D=AK28/2
```



```
1500 D=AK28/2
1510 GOSUB 1840
1520 A=6
1530 B=7
1540 C=N-6
1550 D=AK25/2
1560 GOSUB 1840
1570 A=3
1580 B=9
1590 C=N-9
1600 D=-AK27
1610 GOSUB 1840
1620 A=2
1630 B=11
1640 C=N-10
1650 D=AK24
1660 GOSUB 1840
1670 AS(1,1)=AK13+AK21
1680 AS(N-5,1)=AK13+AK21
1690 AS(2,1)=AK11+AK23
1700 AS(N-4,1)=AK11+AK23
1710 AS(3,1)=AK16+AK26
1720 AS(N-3,1)=AK16+AK26
1730 AS(4,1)=AK18+AK22
1740 AS(N-2,1)=AK18+AK22
1750 AS(5,1)=AK12+AK28
1760 AS(N-1,1)=AK12+AK28
1770 AS(6,1)=AK15+AK25
1780 AS(N,1)=AK15+AK25
1790 AS(3,3)=-AK27
1800 AS(N-3,3)=AK27
1810 AS(2,5)=AK24
1820 AS(N-4,5)=-AK24
1830 GOTO 1910
1840 FOR I=A TO C STEP 6
1850 J=8
1860 AS(I,J)=D
1870 NEXT I
1880 RETURN
1890 '*****
1900 'MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ DA COLUNA
1910 FOR I=1 TO 12
1920 FOR J=1 TO 12
1930 SA(I,J)=0
1940 NEXT J
1950 NEXT I
1960 SA(1,1)=AK11
1970 SA(2,2)=AK13
1980 SA(3,3)=AK16
1990 SA(4,4)=AK12
2000 SA(5,5)=AK18
```

2000 SA(5,5)=AK18  
 2010 SA(6,6)=AK15  
 2020 SA(2,6)=AK14  
 2030 SA(3,5)=-AK17  
 2040 SA(5,3)=-AK17  
 2050 SA(6,2)=AK14  
 2060 SA(1,7)=-AK11  
 2070 SA(2,8)=-AK13  
 2080 SA(3,9)=-AK16  
 2090 SA(4,10)=-AK12  
 2100 SA(5,11)=AK18/2  
 2110 SA(6,12)=AK15/2  
 2120 SA(2,12)=AK14  
 2130 SA(3,11)=-AK17  
 2140 SA(5,9)=AK17  
 2150 SA(6,8)=-AK14  
 2160 SA(7,1)=-AK11  
 2170 SA(8,2)=-AK13  
 2180 SA(9,3)=-AK16  
 2190 SA(10,4)=-AK12  
 2200 SA(11,5)=AK18/2  
 2210 SA(12,6)=AK15/2  
 2220 SA(12,2)=AK14  
 2230 SA(11,3)=-AK17  
 2240 SA(9,5)=AK17  
 2250 SA(8,6)=-AK14  
 2260 SA(7,7)=AK11  
 2270 SA(8,8)=AK13  
 2280 SA(9,9)=AK16  
 2290 SA(10,10)=AK12  
 2300 SA(11,11)=AK18  
 2310 SA(12,12)=AK15  
 2320 SA(8,12)=-AK14  
 2330 SA(9,11)=AK17  
 2340 SA(11,9)=AK17  
 2350 SA(12,8)=-AK14  
 2360 \*\*\*\*\*  
 2370 MONTAGEM DA MATRIZ DE CARREGAMENTO  
 2380 P(1)=PL  
 2390 P(2)=-P-P\*(L-AA)^2\*(L+2\*AA)/(L^3)  
 2400 P(3)=-PT-PT\*(L-AA)^2\*(L+2\*AA)/(L^3)  
 2410 P(4)=0  
 2420 P(5)=PT+PT\*AA\*(L-AA)^2/(L^2)  
 2430 P(6)=-P-P\*AA\*(L-AA)^2/(L^2)  
 2440 P(7)=0  
 2450 P(8)=-P\*AA^2\*(L+2\*(L-AA))/(L^3)  
 2460 P(9)=-PT\*AA^2\*(L+2\*(L-AA))/(L^3)  
 2470 P(10)=0  
 2480 P(11)=-PT\*(L-AA)\*AA^2/(L^2)  
 2490 P(12)=+P\*(L-AA)\*AA^2/(L^2)  
 2500 P(6)=P(6)-U\*L^2/12

```
2500 P(6)=P(6)-W*L^2/12
2510 P(N)=P(N)+W*L^2/12
2520 P(2)=P(2)-W*L/2
2530 P(N-4)=P(N-4)-W*L/2
2540 FOR I=8 TO N-10 STEP 6
2550 P(I)=P(I)-W*L
2560 NEXT I
2570 FOR I=1 TO 12
2580 PP(I)=P(I)
2590 NEXT I
2600 '*****
2610 'RESOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES
2620 FOR I=1 TO N
2630 P(I)=P(I)/AS(I,1)
2640 IF I=N THEN 2800
2650 FOR J=2 TO 11
2660 C(J)=AS(I,J)
2670 AS(I,J)=C(J)/AS(I,1)
2680 NEXT J
2690 FOR J1=2 TO 11
2700 J2=I+J1-1
2710 IF N<J2 THEN 2780
2720 J=0
2730 FOR J3=J1 TO 11
2740 J=J+1
2750 AS(J2,J)=AS(J2,J)-C(J1)*AS(I,J3)
2760 NEXT J3
2770 P(J2)=P(J2)-C(J1)*P(I)
2780 NEXT J1
2790 NEXT I
2800 I=I-1
2810 IF I=0 THEN 2880
2820 FOR J=2 TO 11
2830 J1=I+J-1
2840 IF N<J1 THEN 2860
2850 P(I)=P(I)-AS(I,J)*P(J1)
2860 NEXT J
2870 GOTO 2800
2880 REM
2890 FOR I=7 TO 12
2900 P(I)=P(I-6)
2910 NEXT I
2920 FOR I=1 TO 6
2930 P(I)=0
2940 NEXT I
2950 PPP(7)=P(8)
2960 PPP(8)=-P(7)
2970 PPP(9)=P(9)
2980 PPP(10)=P(11)
2990 PPP(11)=-P(10)
3000 PPP(12)=P(12)
```

```
3000 PPP(12)=P(12)
3010 FOR I=1 TO 12
3020 F(I)=0
3030 FOR K=1 TO 12
3040 F(I)=F(I)+SA(I,K)*PPP(K)
3050 NEXT K
3060 NEXT I
3070 LPRINT"FC=";ABS(F(1));"MP=";ABS(F(6));"ML=";ABS(F(5))
3080 '*****
3090 'GRAVACAO DE ARQUIVO SEQUENCIAL DE NOME C.T
3100 PC=ABS(F(1))
3110 MCP=ABS(F(6))
3120 MCL=ABS(F(5))
3130 MV$=STR$(MV)
3140 MH$=STR$(MH)
3150 PC$=STR$(PC)
3160 MCP$=STR$(MCP)
3170 MCL$=STR$(MCL)
3180 MG$=STR$(MG)
3190 OPEN"O",#1,"C.T"
3200 PRINT#1,MV$;" ";MH$;" ";PC$;" ";MCP$;" ";MCL$;" ";MG$
3210 CLOSE#1
3220 '*****
3230 'ENCADEAMENTO COM O PROGRAMA M.BAS
3240 CLEAR
3250 CHAIN"M
```

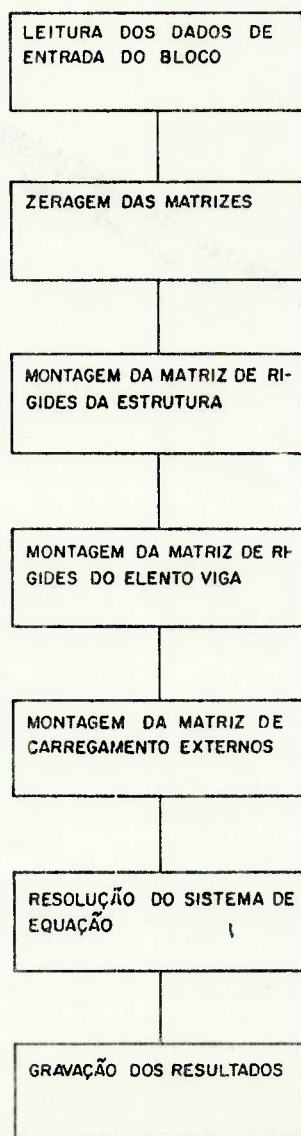
### 5.8.3 Variáveis do Bloco H

É igual ao dos blocos anteriores

### 5.8.4 Descrição do Bloco

Neste bloco se calcula os dois momentos e a força de compressão nas colunas sendo que entre as linhas 2760 e 2810, existe uma passagem do sistema global de referência para o local, dos deslocamentos. Finalizando gravando todos os carregamentos calculados num arquivo "C.T." e chamando o bloco "OK.BAS" iniciando-se assim a busca de otimização da relação viga/colunas.

### 5.8.5 Diagrama deste Bloco



## 6. EXEMPLOS

A seguir mostraremos três (3) exemplos numéricos:

1. Carga máxima por roda	- 30 KN
Força transversal por roda	- 3 KN
Força longitudinal	- 4,3 KN
Grupo da ponte segundo DIN 15018	- H2
Distância entre colunas	- 800 cm
Altura das colunas	- 600 cm
Distância entre rodas	- 170 cm
Número de colunas	- 4

Processamento feito em aproximadamente 50 min.:

a) Resultado da primeira busca da relação viga / coluna com os carregamentos de partida:

- Viga

$$H = 300 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

$$T1 = 5/8''$$

$$T2 = 1-4''$$

$$\text{Área} = 114,3 \text{ cm}^2$$

- Coluna

$$H = 200 \text{ mm}$$

$$B = 200 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 50,8 \text{ cm}^2$$

b) Resultado da segunda busca da relação viga / coluna e já o resultado final:

- Viga

$$H = 300 \text{ mm}$$

B = 300 mm  
T1 = 3/8"  
T2 = 1/4"  
Área = 76,2 cm<sup>2</sup>

uma redução de 55% na área da viga.

- Coluna

H = 200 mm  
B = 200 mm  
T1 = 1/4"  
T2 = 1/4"  
Área = 39,69 cm<sup>2</sup>

uma redução de 48% na área da coluna.

2) Carga máxima por roda	- 50 KN
Força transversal por roda	- 5 KN
Força longitudinal	- 7,1 KN
Grupo da ponte segundo DIN 15018	- H2
Distância entre colunas	- 600 cm
Altura das colunas	- 500 cm
Distância entre rodas	- 170 cm
Número de colunas	- 4

Processamento feito em aproximadamente 1 hora:

a) Resultado da primeira busca da relação viga / coluna com os carregamentos de partida:

- Viga

H = 300 mm  
B = 300 mm  
T1 = 1/2"  
T2 = 1/4"  
Área = 95,25 cm<sup>2</sup>

- Coluna

$$H = 300 \text{ mm}$$

$$B = 200 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 57,15 \text{ cm}^2$$

b) Resultado da segunda busca da relação viga / coluna e já o resultado final:

- Viga

$$H = 400 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 82,55 \text{ cm}^2$$

uma redução de 13% na área da viga.

- Coluna

$$H = 200 \text{ mm}$$

$$B = 200 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 50,8 \text{ cm}^2$$

uma redução de 11% na área da coluna.

3) Carga máxima por roda	- 273 KN
Força transversal por roda	- 27,3 KN
Força longitudinal	- 39 KN
Grupo da ponte segundo DIN 15018	- H3
Distância entre colunas	- 700 cm
Altura das colunas	- 400 cm
Distância entre rodas	- 340 cm
Número de colunas	- 10



Processamento feito em aproximadamente 2h45min.:

a) Resultado da primeira busca da relação viga / coluna com os carregamentos de partida:

- Viga

$$H = 600 \text{ mm}$$

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/4''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 228,6 \text{ cm}^2$$

- Coluna

$$H = 500 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

$$T1 = 5/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 127 \text{ cm}^2$$

b) Resultado da segunda busca da relação viga/coluna:

- Viga

$$H = 500 \text{ mm}$$

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/9''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 222,25 \text{ cm}^2$$

- Coluna

$$H = 400 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 82,55 \text{ cm}^2$$

c) Resultado da terceira busca da relação viga/coluna:

- Viga

$$H = 500 \text{ mm}$$

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/4''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 222,25 \text{ cm}^2$$

- Coluna

$$H = 400 \text{ mm}$$

$$B = 200 \text{ mm}$$

$$T1 = 5/8''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 88,9 \text{ cm}^2$$

d) Resultado da quarta busca da relação viga/coluna:

- Viga

$$H = 600 \text{ mm}$$

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/4''$$

$$T2 = 1/4''$$

$$\text{Área} = 228,6 \text{ cm}^2$$

não houve redução de área.

- Coluna

$$H = 400 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

$$T1 = 3/8''$$

$$T2 = 3/8''$$

$$\text{Área} = 92,25 \text{ cm}^2$$

uma redução de 25% na área da coluna.

## 7. CONCLUSÃO

Como podemos concluir, a metodologia usada neste trabalho pode ser aplicada a qualquer tipo de estrutura a ser otimizada. Basicamente, teríamos somente que estudar as várias características especiais de tal estrutura e elaborar uma automatização que utilize tais características e preveja todos os casos de carga e de solicitações possíveis para, em seguida, otimizá-la.

Outra característica deste trabalho é a de que ele pode utilizar equipamentos de vários tamanhos, desde microcomputadores até grandes computadores, bastando para isto verificar a disponibilidade de equipamento e o seu custo de utilização em relação ao tipo de estrutura estudada.

Como mostram os exemplos, este trabalho produziu resultados satisfatórios, mostrando-se eficaz nos testes realizados.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- (1) LIMA, Victor M. de Souza e VENÂNCIO Fº, Fernando. Considerações sobre a não linearidade geométrica em estruturas reticuladas. São Paulo, 1982. Trabalho apresentado ao 3º Seminário da Escola de Matemática Aplicada do Laboratório de Computação Científica do CNPq.
- (2) LIMA, Victor M. de Souza e VENÂNCIO Fº, Fernando. A noção de rigidez no estudo da não linearidade geométrica de estruturas reticuladas. Salvador, 1984. Trabalho apresentado ao 10º Congresso Sul Americano de Métodos Computacionais em Engenharia.
- (3) VENÂNCIO Fº, Fernando. Análise matricial de estruturas. Rio de Janeiro, Almeida Neves Editores, 1975.
- (4) LIVESLEY, R. K.. Matrix methods of structural analysis. Ed. New York, Pergamon Press, 1975.
- (5) CONVERSE, A. O.. Optimization. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- (6) NOVAES, Antonio Galvão. Métodos de otimização. São Paulo, Edigar Blücher, 1978.
- (7) ZIENKIEWICZ, O. C.. The finite element method. London, Mac Grawhill, 1977.
- (8) NELSON, Richard B. e FELTON, Lewis P.. Thin-walled beams in frame synthesis. AIAA Jornal, 10 (12): 1565-9, Dec. 1972.
- (9) FELTON, Lewis P. e NELSON, Richard B. Optimized components in frame synthesis. AIAA Jornal, 9 (6): 1027-31, Jun. 1971.
- (10) DIN 4132. Kranbanen stahltragwerke. 1981

- (11) DIN 4114. Stahlbau; stabilitäts fälle. 1974.
- (12) GREGOR, Alfred. Der braktische stahl. Berlin, Veb Verlag für Bauwesen, 1969.
- (13) TIMOSHENKO, Stephen P. e GERE, James M.. Theory of elastic stability. New York, MacGraw - Hill Book Company, Inc., 1961.
- (14) ROARK, Raymond J. e YOUNG, Warren C.. Formulas for stress and strain. New York, MacGraw - Hill Book Company, Inc., 1975.
- (15) HANNOVER, H. O.. Fahrverhalten von krane. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf, 1974.
- (16) ATREK, E.; GALLAGHER, R.H.; RAGSDALL, K.M. e ZIEMKIEWIEZ, O.C.. New directions in optimum structural design. New York, John Wiley & Sons, 1987.
- (17) WOILER, S.. Implicit enumeration algorithms for discrete optimization problems. Stanford, Department of Industrial Engineering, 1967.
- (18) MORRIS, A. J.. Foundations of structural optimization: a unified approach. New York, John Wiley & Sons, 1982.
- (19) NEUFVILLE, R. e MARKS, D.. System planning and design. New Jersey, Prentice-hall, Inc., 1974.
- (20) BRADLEY, S.P.; HAX, A.C. e MAGNANTI, T.L.. Applied mathematical programming. Reading, Massachusetts, Addison - Wesley Publishing Company, 1977.
- (21) HAUG, E.J. e ARARA, J.S.. Applied optimal design. New York, John Wiles & Sons, 1979.
- (22) DIXON, L.C.W.. Optimization in action. London, Academic Press Inc. Ltd., 1976.

- (23) HUANCHUN, S. e QIN, C.. A sequential two-level for the discrete optimum design of structures. Proc. 2<sup>o</sup> Int's Conference on Computing in Civil Eng'g, Hangghov, China, El Servier, Amsterdam, 1985.
- (24) BROMOWICKI, A.J. e FELTON, L.P.. Optimum design of continuous thin-walled beams. International Journal for Numerical Methods in Engineering (9):711-20, 1975.
- (25) FERNANDES, F.C.F.. Otimização de estrutura de pontes rolantes pela programação geométrica. Dissertação apresentada junto ao Dept<sup>o</sup> de Produção da EPUSP para obtenção do título de Mestre, 1982.