

**CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE E PROJETO DE TORRES
AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Carlos Roberto Gontijo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE E PROJETO DE TORRES
AUTOPORTANTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO"**

Carlos Roberto Gontijo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Alcebíades de Vasconcellos Filho
DEES/UFMG - (Orientador)

Prof. Roberto Martins Gonçalves
EESC/USP

Prof. Ricardo Hallal Fakury
DEES/UFMG

Prof. Armando César Campos Lavall
DEES/UFMG

Belo Horizonte, 22 de março de 1994

A minha esposa Heloisa e aos meus filhos Henrique e Luisa

Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos a tudo e a todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho e em particular:

- Ao professor Alcebiades de Vasconcellos Filho e ao professor Armando César Campos Lavall pela dedicada orientação, paciência, apoio, incentivo e grande colaboração prestada à minha pessoa na elaboração deste trabalho.
- A professora Maria Eugênia Dias de Oliveira pela grande ajuda prestada na revisão do texto.
- Aos meus colegas do Departamento de Engenharia de Estruturas pelo incentivo e ambiente de trabalho.
- Aos meus amigos e colegas da ABB/SBE pelos anos de convivência com projetos de torres para linhas de transmissão.
- Ao IEA – Instituto de Engenharia Aplicada Editora pelo trabalho de ilustração e composição do texto.

Resumo

Neste trabalho apresenta-se um estudo para a análise e projeto de torres autoportantes para linhas de transmissão. Este estudo aborda a determinação das cargas atuantes nas torres, e os processos de cálculo utilizados para a determinação dos esforços solicitantes nas barras da torre e fundações.

Apresentam-se as expressões do processo clássico utilizadas para a determinação dos esforços nos elementos estruturais bem como o dimensionamento destes elementos.

Apresentam-se, para a automatização do projeto de torres, fluxogramas dos programas de geração da geometria e carregamento, de cálculo da estrutura pelo método dos deslocamentos e de dimensionamento das barras e ligações.

Finalmente, apresentam-se resultados e comparações dos cálculos de uma torre pelo processo clássico e pelo método dos deslocamentos.

Abstract

This work presents a study of analysis and design techniques for self supporting steel transmission towers. The determination of the loadings is described, as well as the analysis method used to find member and foundation loads.

The formulation of the classical process to determine member loads and to design structural members and connections is described.

Next, computer flowcharts for automatic tower design are presented, including geometry and load case generation, analysis using the stiffness method and member and connection design.

Finally, the analysis of a tower is performed and the obtained results using the classical and the stiffness methods are compared.

Sumário

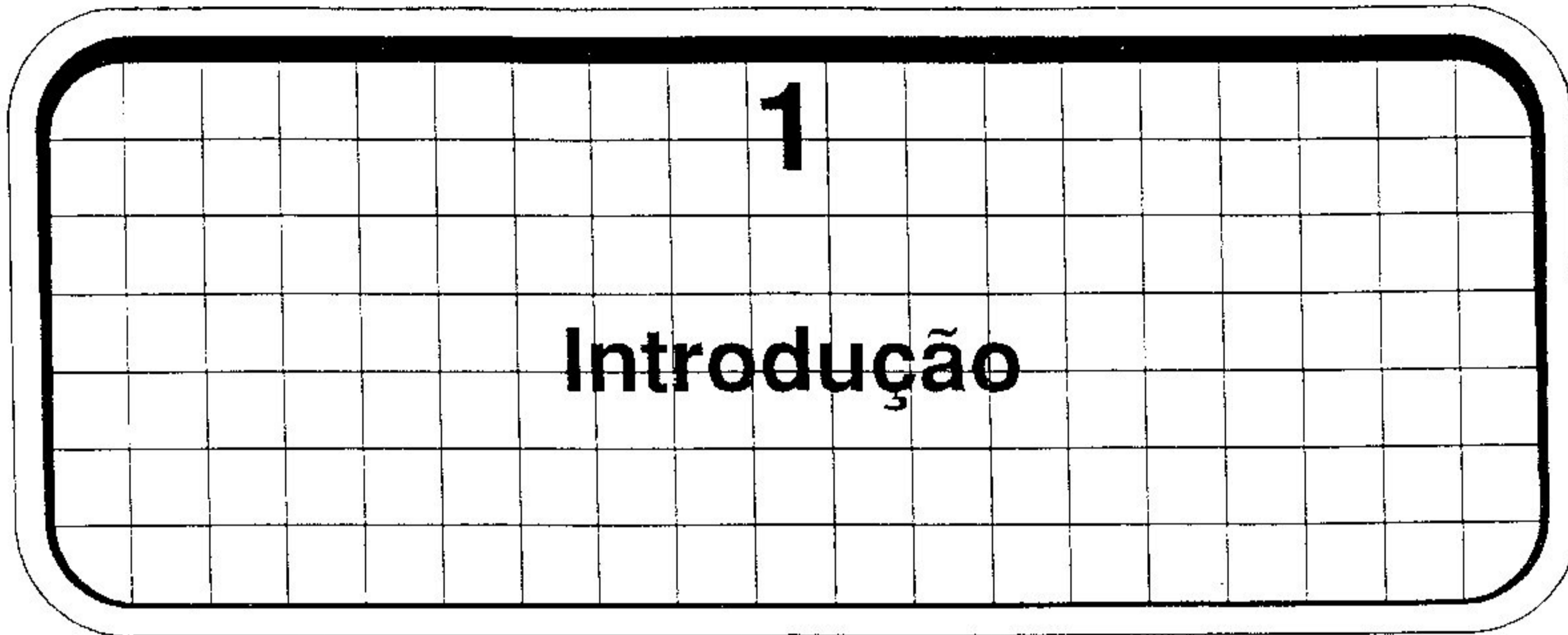
1	Introdução	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Escopo	2
1.3.1	Primeira Parte	2
1.3.2	Segunda Parte	3
2	Implantação das Linhas de Transmissão	4
2.1	Visão Global de um Sistema Elétrico	4
2.1.1	Produção	4
2.1.2	Transmissão	5
2.1.3	Distribuição	5
2.2	Histórico	6
2.3	Família de Torres	7
2.4	Etapas do Projeto das Linhas	8
2.4.1	Viabilização do Recurso Energético	8
2.4.2	Levantamento Topográfico	8
2.4.3	Locação das Estruturas	9
2.4.4	Escolha do Tipo de Torre	10
2.4.5	Cálculo Preliminar das Estruturas	10
2.4.6	Custo Total da Linha de Transmissão	11
2.4.7	Projeto Definitivo	11
2.4.8	Fabricação e Testes	11
2.4.9	Montagem da Linha	12
3	Elementos de Projeto das Torres de Linhas de Transmissão	13
3.1	Normas e Especificações	13
3.1.1	NBR 5422	13
3.1.2	NBR 8850	14

3.1.3	NBR 8842	14
3.2	Tipos de Torres	14
3.2.1	Quanto à Disposição dos Condutores	14
3.2.2	Quanto ao Número de Circuitos	14
3.2.3	Quanto à Função na Linha	14
3.2.4	Quanto à Forma de Resistência das Estruturas	16
3.2.5	Quanto à Voltagem da Linha	16
3.2.6	Quanto ao Formato	16
3.3	Ação do Vento nos Cabos e na Estrutura	16
3.3.1	Ação do Vento nos Cabos	19
3.3.2	Ação do Vento nas Cadeias de Isoladores	20
3.3.3	Ação do Vento no Suporte	20
3.4	Determinação das Cargas Atuantes	21
3.4.1	Carga Devida ao Peso Próprio	22
3.4.2	Carga Devida à Ação do Vento na Estrutura	23
3.4.3	Cargas nos Pontos de Fixação dos Cabos	23
3.5	Definição das Hipóteses de Cálculo	25
3.6	Identificação e Designação dos Elementos Estruturais	26
3.6.1	Identificação das Subestruturas	26
3.6.2	Designação das Barras	27
4	Análise das Torres pelo Processo Clássico	30
4.1	Cálculo do Suporte do Cabo Pára-Raios	30
4.2	Cálculo das Mísulas	32
4.3	Cálculo das Diagonais	34
4.3.1	Diagonais da Cabeça da Torre Tronco-Piramidal	35
4.3.2	Diagonais do Tronco Inferior	37
4.4	Cálculo dos Montantes	38
4.5	Cálculo das Barras das Bases e das Pernas	40
4.5.1	Base Simples	40
4.5.2	Base com Diagonais	41
4.6	Cargas nas Fundações	42
5	Dimensionamento das Barras e Ligações	43
5.1	Barras à Compressão	43
5.1.1	Tensão Crítica de Flambagem	43

5.1.2	Valores Limites	45
5.1.3	Índice de Esbeltez Efetivo ($K L / r$)	45
5.2	Barras à Tração	46
5.3	Barras Redundantes (Descarregadas)	47
5.4	Ligações	48
5.4.1	Resistências Nominais	48
5.4.2	Distâncias Mínimas e Usuais	50
5.4.3	Estados Limites Últimos	53
6	Dimensionamento das Fundações	55
6.1	Dimensionamento da Fundação em Grelha Metálica	56
6.1.1	Verificação do Arrancamento da Fundação	56
6.1.2	Verificação da Compressão no Terreno	57
6.1.3	Verificação da Grelha Metálica e Montantes	59
6.2	Dimensionamento de um Stub	60
6.2.1	Comprimento Mínimo do Stub	61
6.2.2	Número de Aletas	61
6.2.3	Ligação das Aletas com o Stub	62
7	Programas para Análise e Dimensionamento	64
7.1	Fluxo Geral do Sistema	64
7.2	Geração da Geometria	66
7.2.1	Descrição dos Registros dos Dados de Entrada	67
7.2.2	Fluxograma da Rotina TPGEOM	79
7.3	Geração dos Carregamentos	81
7.3.1	Descrição dos Registros dos Dados de Entrada	81
7.3.2	Fluxograma da Rotina TPGCAR	87
7.4	Cálculo pelo Método dos Deslocamentos	89
7.4.1	Fluxograma da Rotina TPAETO	89
7.4.2	Nós Hipostáticos	90
7.5	Dimensionamento das Barras e Ligações	92
7.5.1	Descrição dos Dados de Entrada	92
7.5.2	Fluxograma da Rotina TPDIBP	93
8	Exemplos Comparativos	95
8.1	Processo Clássico versus Método dos Deslocamentos	95

VII

9	Conclusões e Sugestões	103
9.1	Conclusões	103
9.2	Sugestões	104
9.2.1	Locação de Torres por Computador	104
9.2.2	Cálculo das Fundações	104
9.2.3	Análise Conjunta da Torre e Fundação	105
9.2.4	Análise em Segunda Ordem	105
9.2.5	Postes Tubulares	105
9.2.6	Programas Mais Amigáveis	105
9.2.7	Otimização do Processo Global	106
	Referências Bibliográficas	107
	Apêndice A	110
	Arquivo de Entrada de dados e	
	Saída de Resultados do Primeiro Exemplo	110



1.1 Considerações Gerais

O grande potencial hidroelétrico nacional com seus recursos energéticos geralmente localizados a uma grande distância dos centros consumidores têm levado no Brasil à solução do transporte de energia em extensas linhas de transmissão.

As estruturas treliçadas, utilizadas em todo o mundo desde o início do século para o suporte das linhas de transmissão de energia, têm sido uma solução bem competitiva para este objetivo. Normalmente estas estruturas são fabricadas com cantoneiras laminadas, as ligações feitas com parafusos e utilizam, para as fundações, grelhas metálicas, tubulões e sapatas.

Ainda que de forma limitada, alguns fabricantes de torres de linhas de transmissão estão substituindo os perfis laminados por perfis de chapas dobradas a frio que permitem a fabricação automatizada a partir de bobinas de aço [26].

As fábricas atuais são montadas buscando maior automação. Para tanto utilizam máquinas de controle numérico específicas para cantoneiras e chapas. Tal tipo de fabricação, onde praticamente não existe a união de peças com o uso de soldas e no qual são processados apenas elementos estruturais leves, favorece a utilização de máquinas computadorizadas.

A bibliografia sobre as torres para linhas de transmissão é pequena e o tema bastante vasto, razão pela qual fomos motivados a desenvolver o presente trabalho.

1.2 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é apresentar um estudo detalhado sobre o cálculo de torres auto-portantes das linhas de transmissão; em particular, serão também abordados alguns itens específicos de seu projeto:

- Uma estrutura para linha de transmissão é composta de várias subestruturas tais como: corpo básico, extensões do corpo básico e pernas.

Estas subestruturas, quando combinadas, formarão uma estrutura particular que atenderá uma determinada situação para certa localização na linha de transmissão.

Podemos dizer que existe uma família de torres que utilizará o mesmo corpo básico.

- Geralmente várias hipóteses de carregamento são usadas no cálculo de uma estrutura devido, principalmente à ação do vento em diversas direções, às condições de verificação de rompimentos dos cabos, às cargas verticais diferentes decorrentes da desigualdade de vãos adjacentes e à verificação da estrutura com um ou dois circuitos montados.

- Na análise de treliças espaciais pelo método dos deslocamentos uma situação particular que se apresenta é a ocorrência de singularidade na matriz de rigidez, pela utilização de treliçamentos que conduzem à formação de nós hipostáticos, ou seja, nós cujas barras concorrentes estão situadas no mesmo plano.

A especificidade do projeto de torres levou-nos a desenvolver um sistema composto de programas específicos para a automatização do projeto, a saber: geração do carregamento, da geometria, cálculo da torre e dimensionamento das barras e ligações.

1.3 Escopo

1.3.1 Primeira Parte — Nessa parte, compreendida pelos Capítulos 2 a 6, pretendemos apresentar de forma didática toda a sequência de etapas para se projetar e calcular torres de linhas de transmissão.

No Capítulo 2, damos uma visão global do projeto de uma linha de transmissão. Partindo de um sistema elétrico genérico, localizamos as torres no

conjunto e mostramos a utilização destas estruturas dentro do sistema. Veremos também um breve histórico do projeto de torres e mostraremos um fluxo geral das etapas de projeto de uma linha de transmissão.

Nos Capítulos 3 a 6 apresentaremos uma metodologia para o projeto de torres treliçadas. Serão abordados os seguintes assuntos:

- Cargas atuantes na estrutura.
- Elementos estruturais de uma torre.
- Cálculo dos esforços solicitantes utilizando o processo clássico.
- Dimensionamento dos elementos estruturais e de fundações usando grelha metálica e *stub*.

1.3.2 Segunda Parte — Nessa parte, compreendida pelos Capítulos 7 a 9, apresentaremos alguns fluxogramas de programas por nós desenvolvidos para análise e dimensionamento, alguns exemplos comparativos bem como nossas conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

No Capítulo 7 apresentaremos as seguintes rotinas específicas para o projeto de torres de linhas de transmissão:

- Geração automática das barras e coordenadas de uma torre.
- Geração dos carregamentos utilizados no cálculo da torre.
- Cálculo pelo método dos deslocamentos.
- Dimensionamento de barras à tração e à compressão e suas ligações utilizando cantoneiras laminadas.

No Capítulo 8 compararemos os resultados obtidos através dos processos de cálculo apresentados nos capítulos anteriores. As comparações serão entre resultados obtidos pelo processo clássico e pelo método dos deslocamentos.

Finalmente, no Capítulo 9 apresentaremos nossas conclusões e sugestões para novos temas a serem estudados.

2

Implantação das Linhas de Transmissão

2.1 Visão Global de um Sistema Elétrico

Um sistema elétrico é composto basicamente pelos três componentes mostrados na Figura 2.1: produção da energia, transmissão e distribuição da energia aos consumidores finais [11].

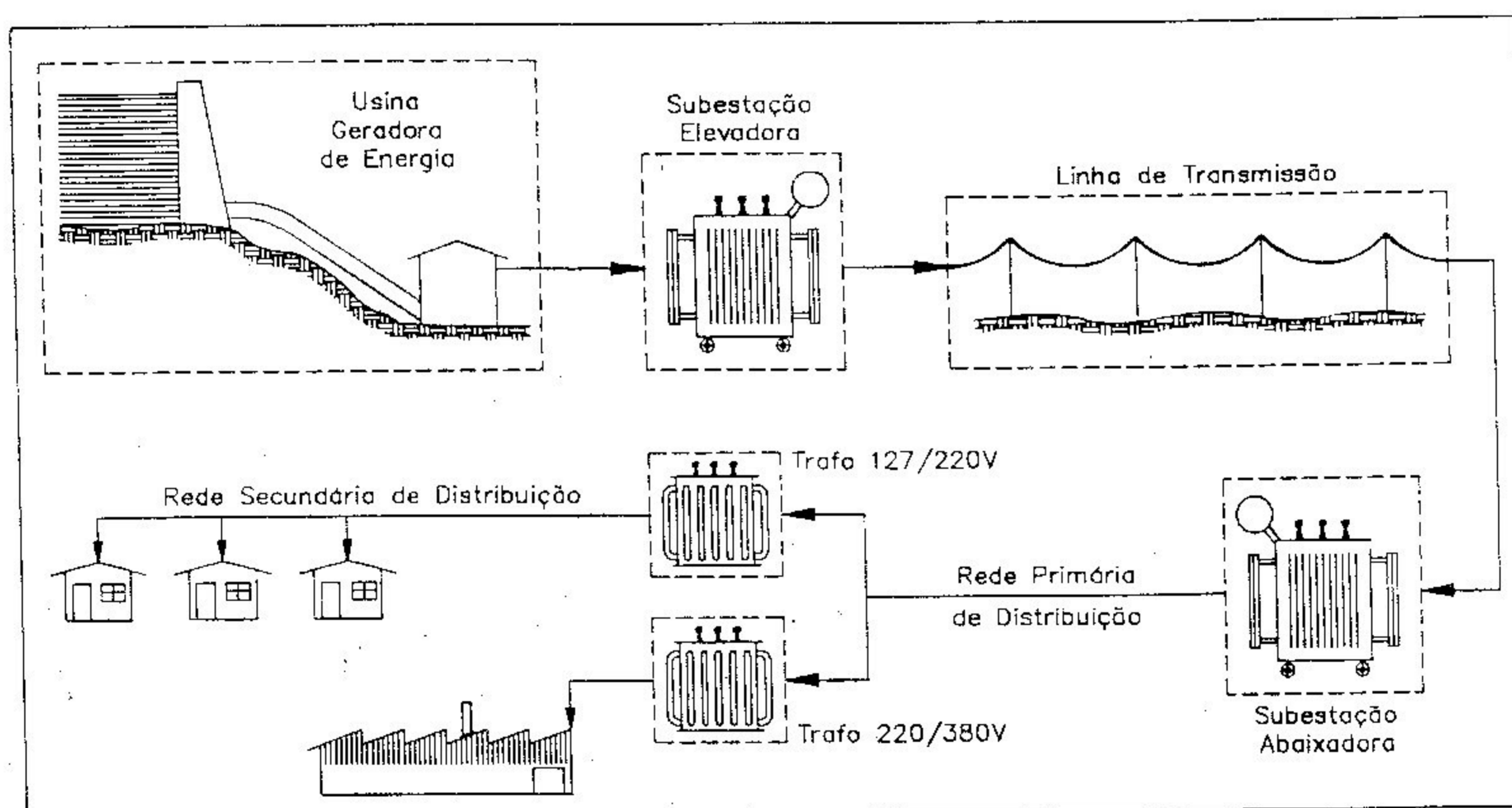


Figura 2.1
Produção, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica

2.1.1 Produção — A geração da energia na fase de produção pode ser feita através de hidroelétricas, aproveitando a energia potencial da água, termoelétrica, usinas nucleares ou outras formas como eólica e solar. Nesta fase, geralmente, é utilizado um gerador síncrono de energia acionado por uma turbina hidráulica ou a vapor.

Atualmente a forma de produção de energia mais utilizada no Brasil é a gerada pelas hidroelétricas. O motivo principal é o nosso grande potencial hidráulico, calculado em aproximadamente 150 mW.

A energia gerada em todo o território brasileiro é trifásica, alternada, com a frequência de 60 ciclos por segundo e normalmente com a tensão de 13,8 kV.

2.1.2 Transmissão — A transmissão da energia gerada na produção para os centros consumidores é feita através de linhas elétricas de transmissão, usualmente a tensões elevadas. A Tabela 2.1 mostra uma classificação para as linhas em função do seu nível de tensão.

A subestação (vide Figura 2.1) situada junto à unidade de produção de energia eleva a tensão até valores que permitam uma menor perda de energia na transmissão. As tensões utilizadas para a transmissão situam-se entre 69 kV a 500 kV. Quanto maior for a distância a ser percorrida maior será a tensão da linha.

Em linhas extensas — que requerem tensões acima de 500 kV — são exigidos estudos detalhados para a fixação do tipo de corrente entre a alternada e a contínua. No caso de prevalecer a corrente contínua, haveria uma subestação retificadora, após a elevadora, para a conversão alternada/contínua e uma subestação alternadora, precedendo a abaixadora, para a conversão contínua/alternada.

Nível de Tensão	Classificação
≤ 230 kV	AT = Alta tensão
Entre 230 kV e 700 kV	EAT = Extra alta tensão
> 700 kV	UAT = Ultra alta tensão

2.1.3 Distribuição — Após a transmissão da energia existe uma subestação abaixadora, vide ainda a Figura 2.1, cuja finalidade é trazer a tensão para os valores padronizados das redes de distribuição primária (11 kV — 13,2 kV — etc).

Este abaixamento é feito dentro do centro de distribuição, isto é, uma cidade, um parque industrial ou outro local de consumo de energia. A energia entra, então, na rede de distribuição primária.

Transformadores locais, conectados à rede de distribuição secundária que serve aos usuários, abaixam finalmente a tensão para os níveis de consumo (127V — 220V — 380V).

As redes de distribuição primária e secundária são, geralmente, trifásicas e as ligações com os consumidores podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas. A Tabela 2.2 ilustra o número de fases normalmente utilizadas em redes de distribuição em função da carga máxima de consumo.

Nível Potência	Número Fases	Número Condutores
≤ 4 kW	Monofásica	2
Entre 4 kW e 8 kW	Bifásica	3
> 8 kW	Trifásica	3 ou 4

2.2 Histórico

No início do século XX surgiram as primeiras linhas para transmissão de energia elétrica. Com o passar dos anos aumentaram as distâncias entre as usinas de geração de energia e os centros consumidores, o que exigiu o aumento do nível da tensão e da potência usadas na transmissão de energia. Os materiais empregados para as estruturas suporte das linhas de transmissão, ao longo deste período, são praticamente os mesmos. Para tensões baixas, até aproximadamente 69 kV, os materiais mais utilizados são a madeira, o concreto armado e o aço. Para tensões superiores, geralmente, a solução mais econômica é a de estruturas metálicas.

Seguindo uma arquitetura quase padronizada, as estruturas de aço treliçadas têm sido as mais utilizadas para o transporte de energia em um ou dois circuitos. Entre estas existem as chamadas torres auto-portantes do tipo tronco piramidal usadas, até hoje, em praticamente todos os níveis de tensões, mostradas nas Figuras 2.2 (a), (b), (c) e (f) nas configurações com um e dois circuitos [32]. Com o tempo, e principalmente devido ao aumento da distância entre o ponto gerador e o consumidor, novas formas de estruturas foram sendo empregadas. Entre estas podemos citar: as torres tipo delta, mostradas nas Figuras 2.2 (d), (e), (g) e (i) e as torres estaiadas como a da Figura 2.2 (h).

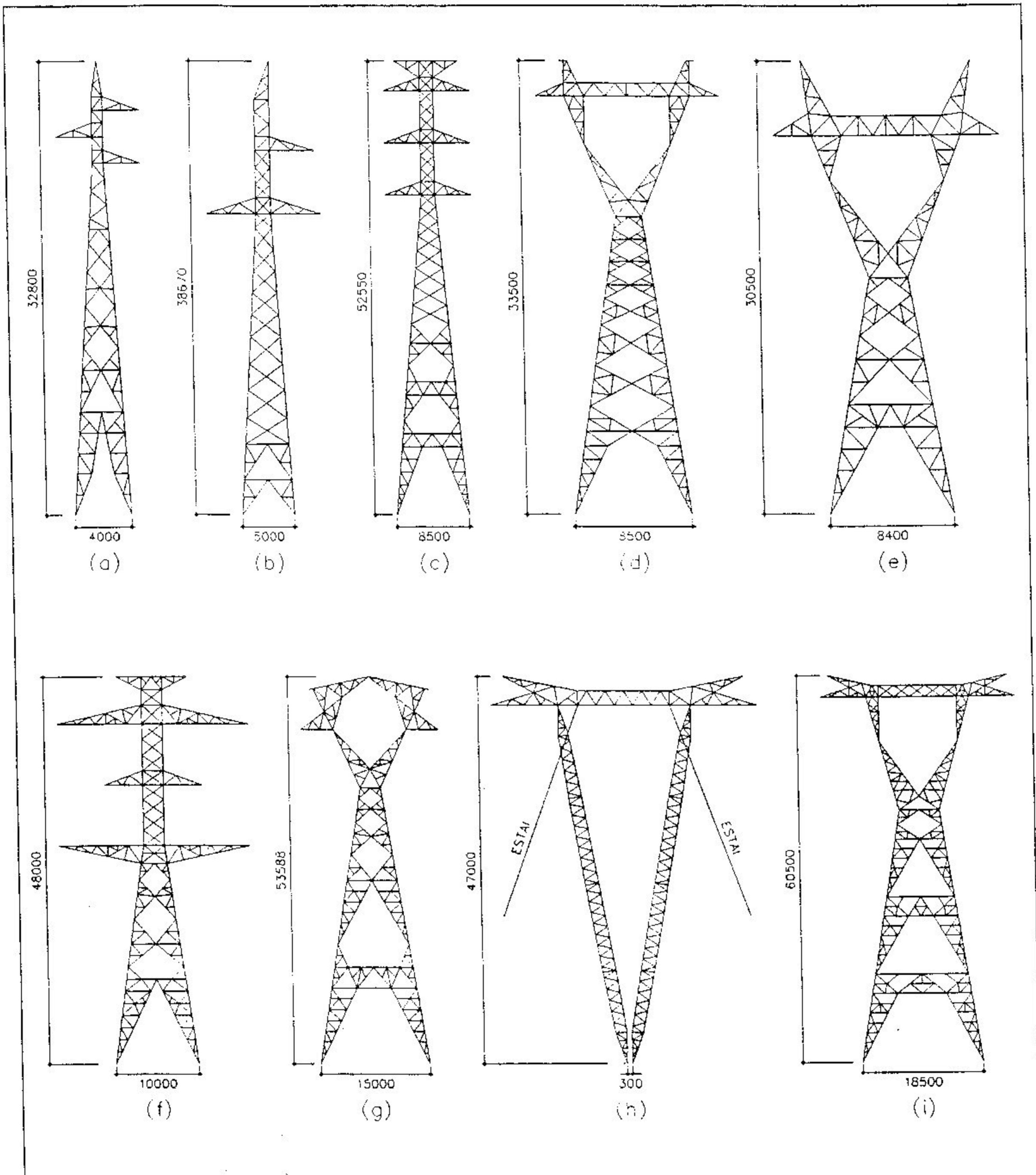


Figura 2.2
Configurações de Torres para 1 e 2 Circuitos
(Dimensões Ilustrativas)

2.3 Família de Torres

Por questão de economia na fabricação e no projeto, as estruturas são padronizadas em famílias de torres. Uma família é composta por torres montadas a partir de sub-estruturas idênticas ou similares. Tais subestruturas são:

- Corpo básico, comum para todas as torres.
- Extensões do corpo básico, em geral com alturas variando de 6 em 6m.
- Pernas, em geral com a altura variando de 1,5 a 9,0 m com incrementos de 1,5 m.

Deste modo, com a combinação destas sub-estruturas podemos obter a estrutura a ser utilizada em um determinado local da linha, a partir da altura da torre e combinação das pernas necessárias para a condição topográfica do local de montagem. Na verdade, cada estrutura poderia ser projetada e dimensionada com os esforços correspondentes ao vão de utilização. Porém isto elevaria muito o custo de projeto e de fabricação já que teríamos, para cada posição de locação de torre, um projeto específico. Exatamente para que isto não ocorra é que utilizamos o projeto por famílias de torres.

2.4 Etapas do Projeto das Linhas

O projeto de uma linha de transmissão, após a definição do local de geração da energia e dos centros consumidores, segue nove etapas seqüenciais [14]. O prazo de execução de cada uma delas é função, principalmente, da extensão da linha e do nível de voltagem utilizado para a transmissão da energia.

2.4.1 Viabilização do Recurso Energético — Esta é a etapa inicial que envolve um estudo de aproveitamento de um determinado recurso energético, verificando sua capacidade de produção, localização e distância em relação aos possíveis centros de consumo de energia. Se o recurso energético for viável economicamente, podemos dizer que já se tem o ponto inicial da linha e para cada centro consumidor teremos uma linha de transmissão. Tal viabilização depende de vários fatores, entre os quais podemos citar:

- Custo da faixa do terreno onde se vai construir a linha de transmissão.
- Topografia da região.
- Voltagem a ser utilizada na linha.
- Capacidade de geração do recurso energético.
- Custo de geração de energia.
- Disponibilidade financeira para a execução da obra.

2.4.2 Levantamento Topográfico — Após a definição do traçado da linha, a próxima etapa é a execução do levantamento topográfico do seu futuro percurso

para gerar o seu perfil. Juntamente com este levantamento são feitas análises do solo na faixa de servidão, nos locais com probabilidade de montagem de estruturas.

2.4.3 Locação das Estruturas — De posse dos dados do levantamento topográfico passa-se, então, para a etapa de locação das estruturas. O processo mais usual é o gráfico que utiliza o perfil longitudinal do eixo da faixa de servidão, como mostrado na Figura 2.3.

O desenho com o perfil longitudinal da linha terá que mostrar claramente os obstáculos e acidentes existentes ao longo da faixa de servidão, além de fornecer as informações necessárias ao projeto tais como: tipo de vegetação, divisas, etc. Tal desenho deverá especificar, também, os pontos obrigatórios para a locação das estruturas, marcos, referências de nível e estacas. Quando o eixo da linha seguir uma meia encosta, as informações referentes à declividade do terreno no sentido transversal também deverão constar do desenho

O projetista de linhas deverá utilizar um gabarito, de material transparente, que reproduza em escala apropriada as curvas do cabo suspenso nas condições de flecha máxima e mínima.

De posse do perfil longitudinal da linha de transmissão, do gabarito e das distâncias mínimas ao terreno pode-se, então, distribuir as estruturas no perfil topográfico. O início desta distribuição é feita pelos pontos obrigatórios onde deverão ser colocadas as estruturas. Estes pontos podem ser:

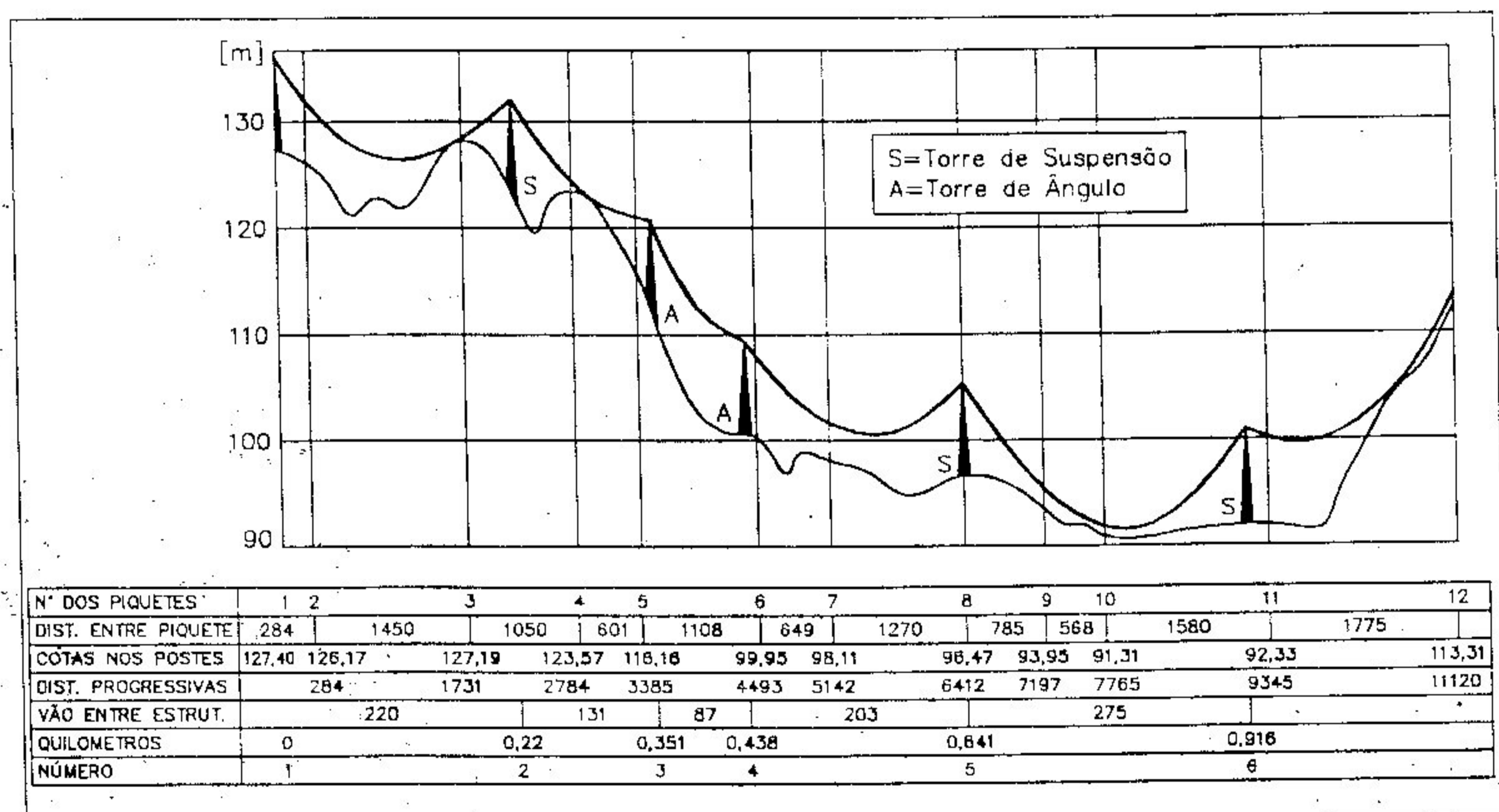


Figura 2.3

Distribuição das Torres de uma Linha de Transmissão [14]

- Início e fim da linha.
- Derivações.
- Travessias.

A distribuição das torres é feita por trechos, começando em uma estrutura de início, ou de fim de linha, e distribuindo as outras torres até o primeiro ponto obrigatório. Este trabalho normalmente é conduzido por tentativas e vale-se sempre da experiência do projetista embora, atualmente, existam programas de computador que procuram otimizar a locação das torres facilitando tal tarefa. Como principais recomendações para o projeto da linha, temos:

- Procurar obter o menor número de torres.
- Uniformizar a distribuição de torres de tal maneira que as distâncias entre estas fiquem aproximadamente iguais.
- Nas travessias de rodovias e ferrovias obedecer as distâncias mínimas de segurança especificadas pelas normas.
- Evitar a locação de torres em brejos, beira de riachos ou rios, fundos de valas, depressões e locais onde exista solo de pouca resistência.

2.4.4 Escolha do Tipo de Torre — A escolha dos tipos de estruturas a serem utilizadas em uma linha de transmissão depende de vários fatores. Abaixo mostramos alguns destes fatores:

- Espaçamento máximo e mínimo entre fases.
- Configuração dos isoladores.
- Ângulo de proteção do cabo pára-raios.
- Distâncias elétricas mínimas entre as partes energizadas e a torre.
- Flecha dos condutores.
- Número de circuitos.
- Altura de segurança.

De posse de todos os dados possíveis para a linha de transmissão é feita uma análise de modo a selecionar a configuração de estrutura de maior viabilidade.

2.4.5 Cálculo Preliminar das Estruturas — Com o resultado do estudo de locação das torres e a escolha do tipo de estrutura podemos confeccionar uma planilha com as quantidades de torres básicas, extensões, pernas e tipos de fundações para cada família de torre. Esta planilha, a especificação para a linha

de transmissão e as normas de projeto, são os elementos necessários para a elaboração da proposta de fornecimento e montagem da linha de transmissão.

Uma empresa interessada no fornecimento das estruturas deverá projetar e calcular todas as famílias de torres para a obtenção do peso de cada elemento estrutural e o custo total da encomenda. Este cálculo preliminar é feito utilizando informações da estrutura tais como: distâncias elétricas mínimas, extensões, pernas a serem utilizadas e carregamentos. O calculista deverá, baseando-se em experiência anterior, desenvolver o projeto arquitetônico da torre, com a determinação das aberturas superiores e inferiores das faces transversal e longitudinal, e a definição do tipo de treliçamento principal e secundário a ser adotado. Com a definição do projeto arquitetônico o engenheiro deverá calcular os esforços solicitantes atuantes na estrutura e dimensionar as barras e as fundações. Atenção especial precisa ser dada à análise conjunta da estrutura com as fundações pois, geralmente, a torre mais leve não garante uma solução global mais econômica.

2.4.6 Custo Total da Linha de Transmissão — Com o projeto das estruturas e fundações podemos obter o custo total para a implantação da linha de transmissão, considerando os seguintes itens:

- Condutores e cabos pára-raios.
- Isoladores.
- Estruturas.
- Fundações.
- Montagem das estruturas.

É importante a avaliação do custo da linha por unidade de comprimento. Este valor poderá ser comparado com o de outras linhas de igual porte executadas anteriormente. A mesma avaliação poderá ser feita para o peso das estruturas por unidade de comprimento da linha.

2.4.7 Projeto Definitivo — No projeto definitivo devemos calcular novamente as estruturas com os valores corretos para as cargas, devido à ação do vento e peso próprio. Após o término do cálculo definitivo serão produzidos os desenhos de detalhamento da estrutura. Todos os projetos, geralmente, são analisados pela empresa contratante.

2.4.8 Fabricação e Testes — Com a aprovação do projeto definitivo, a

estrutura poderá ser fabricada e pré-montada. Esta pré-montagem poderá detectar erros no projeto de detalhamento, que deverão ser corrigidos na medida da necessidade. A estrutura, na maioria das vezes, é testada em escala real em uma estação de testes, geralmente, exclusiva para torres de linha de transmissão. Nos testes em escala real são aplicadas as forças das várias hipóteses de carregamento para as quais a estrutura foi projetada. São anotadas as tensões, através de medidores de deformações, e os deslocamentos.

As forças de cada carregamento são aplicadas de maneira progressiva. Após a aplicação das forças máximas, a estrutura deverá apresentar resistência suficiente para suportar este carregamento durante algum período de tempo. Caso contrário deve ser feita uma análise da falha e executada a correção correspondente no projeto quando, então, um novo teste da estrutura precisará ser realizado para a hipótese de carregamento em questão.

Sendo aprovada a estrutura, através dos testes em escala real, as torres poderão entrar em fabricação.

2.4.9 Montagem da Linha — Esta etapa envolve grande dificuldade de execução pois ao longo do trajeto de uma linha, geralmente, não existem estradas para o transporte das máquinas e equipamentos necessários. O processo de montagem é preparado por uma equipe de trabalhadores que percorre todo o traçado preparando o terreno e executando as obras de fundações das estruturas.

Uma segunda equipe inicia a montagem das estruturas que, depois de concluída, dará lugar à fase final de lançamento, tensionamento, nivelamento e fixação dos cabos.

Os cabos são fornecidos em bobinas e o seu lançamento nas estruturas das linhas normalmente é feito conforme mostrado na Figura 2.4 [14]. Nos locais de apoio dos cabos na estrutura são colocadas roldanas. Com um cabo piloto traciona-se os condutores por um guincho deixando-os suspensos provisoriamente à espera do tensionamento e fixação definitiva.

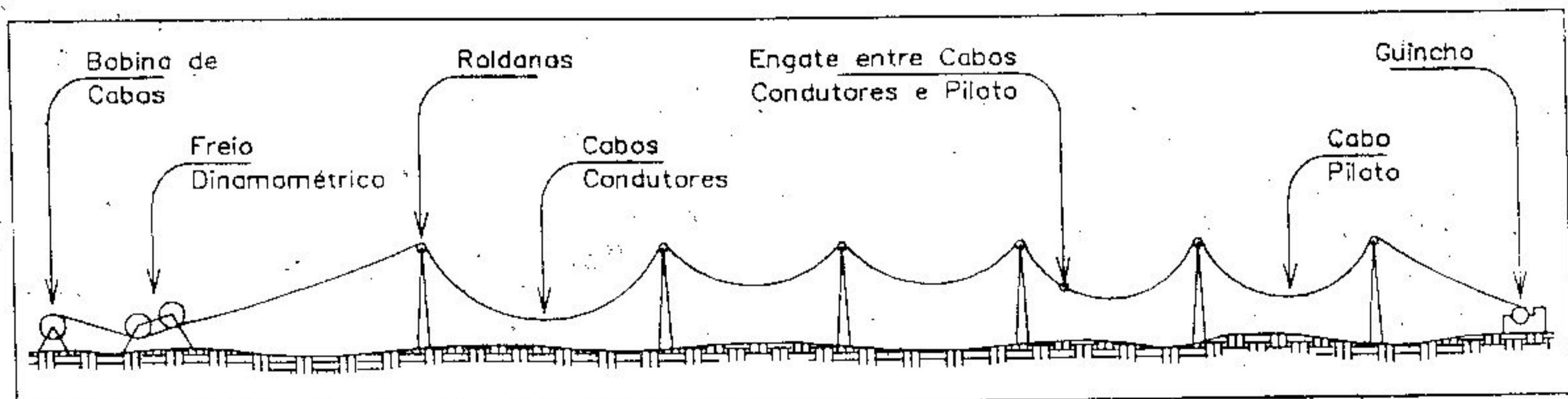


Figura 2.4
Lançamento dos Cabos de uma Linha de Transmissão

3**Elementos de Projeto das
Torres de Linhas de Transmissão****3.1 Normas e Especificações**

O projeto das estruturas para suporte de linhas de transmissão é orientado por normas brasileiras [10] e estrangeiras além de especificações estabelecidas pela empresa contratante dos serviços.

A norma estrangeira de emprego mais usual, o *Guide for Design of Steel Transmission Towers*, da ASCE (*American Society of Civil Engineers*) [4], aplica o método dos coeficientes das ações para o dimensionamento das barras. Na sua utilização, as hipóteses de cálculo são definidas pelas combinações dos vários tipos de ações nominais multiplicadas pelos seus respectivos fatores de ponderação e o dimensionamento dos elementos estruturais é feito comparando-se a solicitação máxima de cálculo atuante no elemento com a sua resistência nominal.

A seguir veremos as normas técnicas brasileiras utilizadas.

3.1.1 NBR 5422 — Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. Fixa as condições básicas para linhas com tensões acima de 38 kV e inferiores a 800 kV. Seus itens mais importantes são:

- Parâmetros Meteorológicos — Orientação para a obtenção da velocidade do vento de projeto com as correções de acordo com a rugosidade do terreno, período de retorno e altura da estrutura.
- Cabos Condutores e Pára-Raios — Condições ambientes para a determinação das hipóteses de cálculo mecânico e de flecha máxima.
- Isoladores e Ferragens — Informações mecânicas e geométricas acerca de isoladores e ferragens utilizadas nas torres.
- Estruturas e Fundações — Determinação das cargas de projeto, definição das hipóteses de carga e recomendações para o cálculo das fundações.

- Esforços Mecânicos — Tipos de esforços mecânicos a que o suporte estará sujeito tais como: cargas de vento, cargas permanentes, cargas de montagem, cargas de manutenção e cargas de contenção para evitar o efeito cascata.
- Distâncias de Segurança.
- Aterramento.
- Travessias.
- Faixas de Segurança.

3.1.2 NBR 8850 — Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão. Orienta as condições básicas para cálculo, projeto e fabricação desses mesmos suportes. Apresenta recomendações tais como curvas de flambagem para as peças comprimidas e informações relativas ao projeto e fabricação.

3.1.3 NBR 8842 — Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão. Orienta as condições básicas para os ensaios de carregamentos dos suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão.

3.2 Tipos de Torres

As estruturas metálicas para linhas de transmissão podem ser classificadas da seguinte maneira [32]:

3.2.1 Quanto à Disposição dos Condutores — Podem ser divididas em triangular, vertical e horizontal. A Figura 3.1 ilustra através das estruturas (a), (b) e (c), respectivamente, esta classificação.

3.2.2 Quanto ao Número de Circuitos — Na Figura 3.1 as estruturas (a) e (c) são torres de um circuito. A estrutura (b) é uma torre de dois circuitos, um à direita e o outro à esquerda.

3.2.3 Quanto à Função na Linha

Estrutura de Suspensão

As torres funcionam como uma estrutura de sustentação dos cabos condutores, suspensos através das cadeias de isoladores, e dos cabos pára-raios, suspensos por

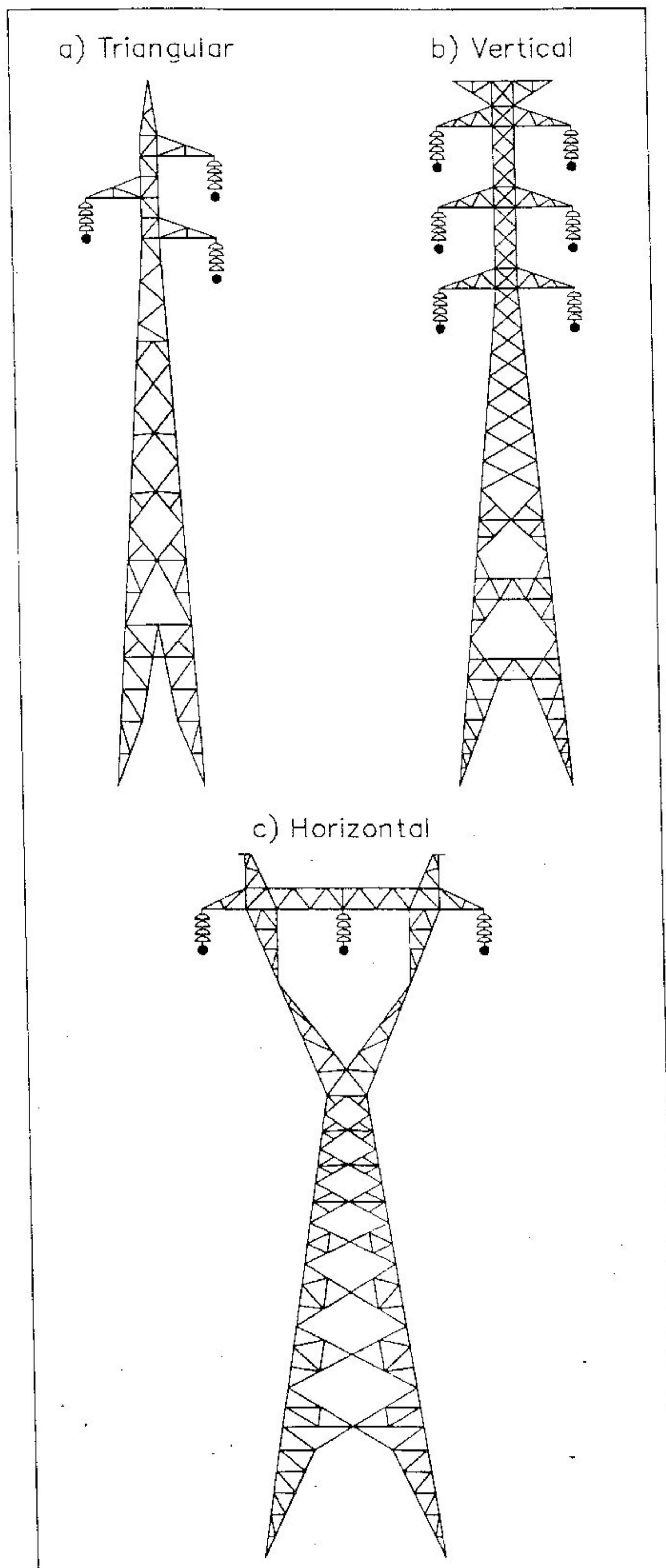


Figura 3.1
Tipos de Torres
quanto à
Disposição dos Condutores

aparelhos. São utilizadas em maior quantidade na linha e usadas em alinhamento ou pequeno ângulo.

Estrutura de Ancoragem

É utilizada para ancoragem dos cabos. Pode ser classificada como terminal, quando usada nas extremidades da linha de transmissão, ou como estrutura de ancoragem intermediária, quando colocada entre as estruturas de suspensão em intervalos variáveis de 5 km a 10 km. Serve ainda como ponto de tensionamento, além de evitar o efeito cascata.

Estrutura em Ângulo

É utilizada em locais onde existe a necessidade de mudança de direção da linha de transmissão.

Estrutura de Derivação

É utilizada caso seja necessária uma derivação em um ponto da linha.

Estrutura de Transposição

É utilizada para assegurar a simetria elétrica de uma linha obtida com a rotação das fases. A Figura 2.2(f) do Capítulo 2, ilustra uma torre de transposição para dois circuitos.

3.2.4 Quanto à Forma de Resistência das Estruturas — São classificadas como autoportantes e estaiadas. As estruturas autoportantes são usadas em todas as funções na linha e as estaiadas somente como estrutura de suspensão, vide Figura 2.2(h) do Capítulo 2.

3.2.5 Quanto à Voltagem da Linha — Um dado muito importante para o projeto de uma estrutura é a tensão de operação da linha de transmissão. Quando aumentamos a capacidade de transporte de energia através da elevação da tensão, necessitamos de um diâmetro maior para os cabos condutores e maiores distâncias elétricas desses cabos às partes não energizadas. No Brasil as voltagens mais utilizadas em linhas de transmissão são: 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV e 765 kV.

3.2.6 Quanto ao Formato — Tomando como referência a Figura 2.2 do Capítulo 2, as estruturas podem ser:

Tronco-Piramidal de circuito simples	(a) e (b)
Tronco-Piramidal de circuito duplo	(c) e (f)
Delta	(d), (e) e (i)
Delta (Cara de Gato)	(g)
Estaiada	(h)

3.3 Ação do Vento nos Cabos e na Estrutura

A determinação dos esforços devido à ação do vento nos cabos e na estrutura é feita conforme a norma brasileira NBR 5422 [10] que passamos a detalhar. Inicialmente é calculada a pressão dinâmica de referência (q_0), a partir da qual podemos obter os esforços aplicados nos cabos, cadeias de isoladores e suportes. Para tanto, temos:

3.1

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad [N/m^2]$$

Nesta expressão, (ρ) é a massa específica do ar e (V_p) a velocidade do vento de projeto. São calculados da seguinte forma:

3.2a

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 t} \left(\frac{16\,000 + 64 t - \text{ALT}}{16\,000 + 64 t + \text{ALT}} \right) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

onde:

t = Temperatura coincidente [°C].

ALT = Altitude média da região de implantação da linha [m].

3.2b

$$V_p = K_r \cdot K_d (H/10)^{1/n} \cdot V_b \text{ [m/s]}$$

onde:

K_r = Coeficiente de rugosidade do terreno, conforme Tabela 3.1.

K_d = Coeficiente de correção do período de integração (t). É a relação entre as velocidades médias a 10 m de altura e sua obtenção é feita com a utilização da Figura 3.2 para os diferentes períodos de integração e rugosidade de terrenos.

H = Altura do elemento em estudo sobre o nível do terreno.

n = Coeficiente de correção da velocidade do vento em função da altura

(H). O valor irá depender da categoria do terreno e do período de integração (t) e poderá ser obtido com a utilização da Tabela 3.2.

V_b = Velocidade básica do vento. É a velocidade de uma rajada, referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 metros de altura do solo, com período de integração de 10 minutos e medida em um terreno com grau de rugosidade (B). Com a Figura 3.3 podemos obter (V_b) em qualquer ponto do Brasil.

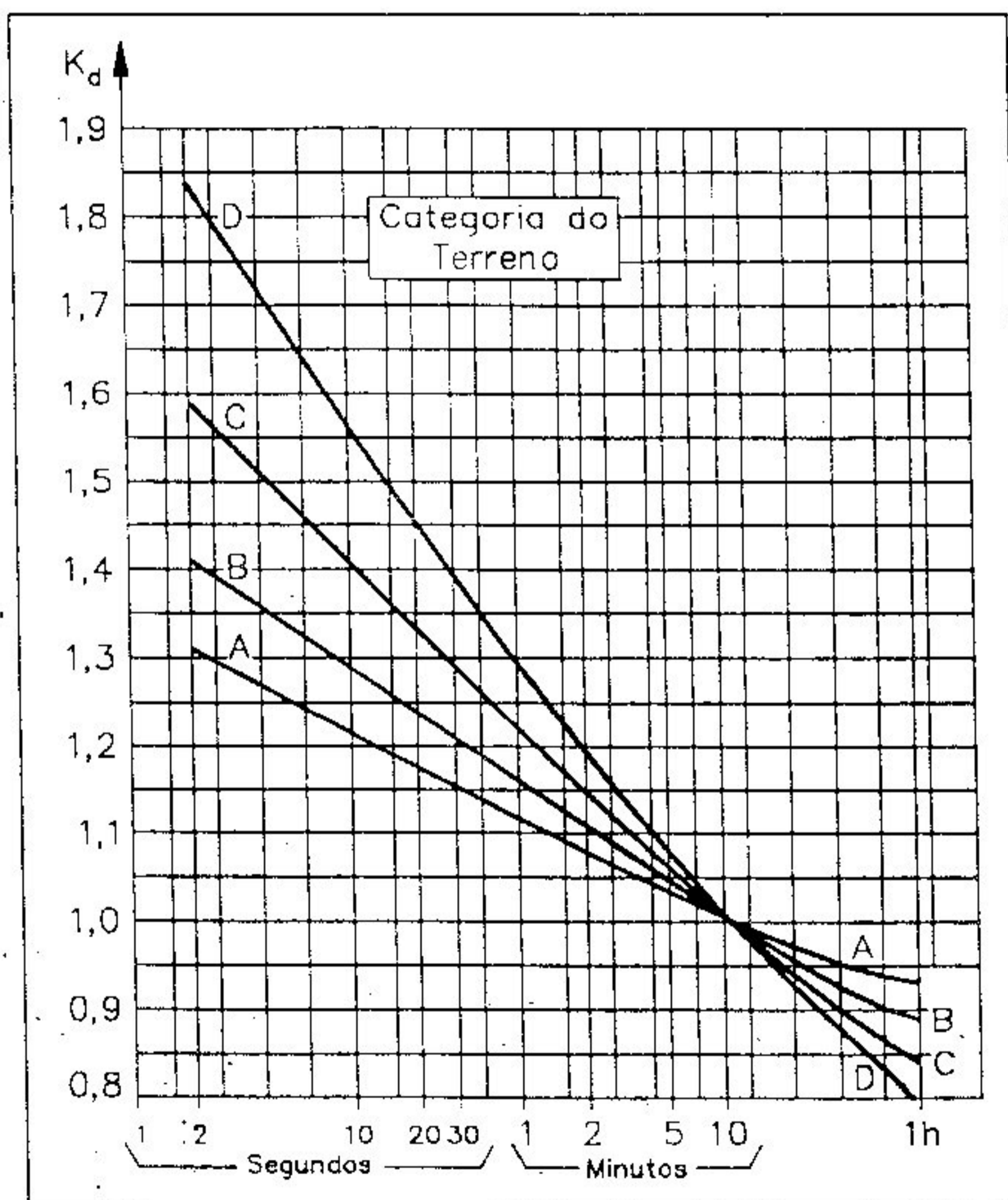


Figura 3.2
Relação entre as
Velocidades Médias a 10 m de Altura

Tabela 3.1 Coeficiente de Rugosidade do Terreno (K_r) (1,2,3)		
Categoria do Terreno	Características do Terreno	Coeficiente de Rugosidade (K_r)
A	Vastas extensões de água, áreas planas costeiras e desertos planos.	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos.	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos.	0,85
D	Áreas urbanizadas e terrenos com muitas árvores altas.	0,67
(1) Em vales, que possibilitem uma canalização do vento em direção desfavorável, deve-se adotar uma categoria imediatamente anterior.		
(2) Os valores de (K_r) correspondem a uma velocidade de vento com período de integração de 10 minutos, medida a 10 metros do solo.		
(3) Os coeficientes para rugosidades intermediárias podem ser obtidos por interpolação.		

Tabela 3.2 Valores de (n) para Correção da Velocidade do Vento em Função da Altura		
Categoria do Terreno	(n)	
	t = 2 segundos	t = 30 segundos
A	13,0	12,0
B	12,0	11,0
C	10,0	9,5
D	8,5	8,0



Figura 3.3

Velocidade Básica do Vento [10] no Brasil [m / s]

3.3.1 Ação do Vento nos Cabos — Os esforços provocados pela ação do vento nos cabos são aplicados nos pontos de sua fixação na estrutura e podem ser obtidos com a utilização da expressão:

3.3

$$A_c = q_0 \cdot \alpha \cdot d \cdot V_v \cdot \text{sen}^2 \varphi$$

onde:

α = Fator de efetividade. É um número adimensional que depende do vão de vento e da categoria do terreno e determinado pela Figura 3.4.

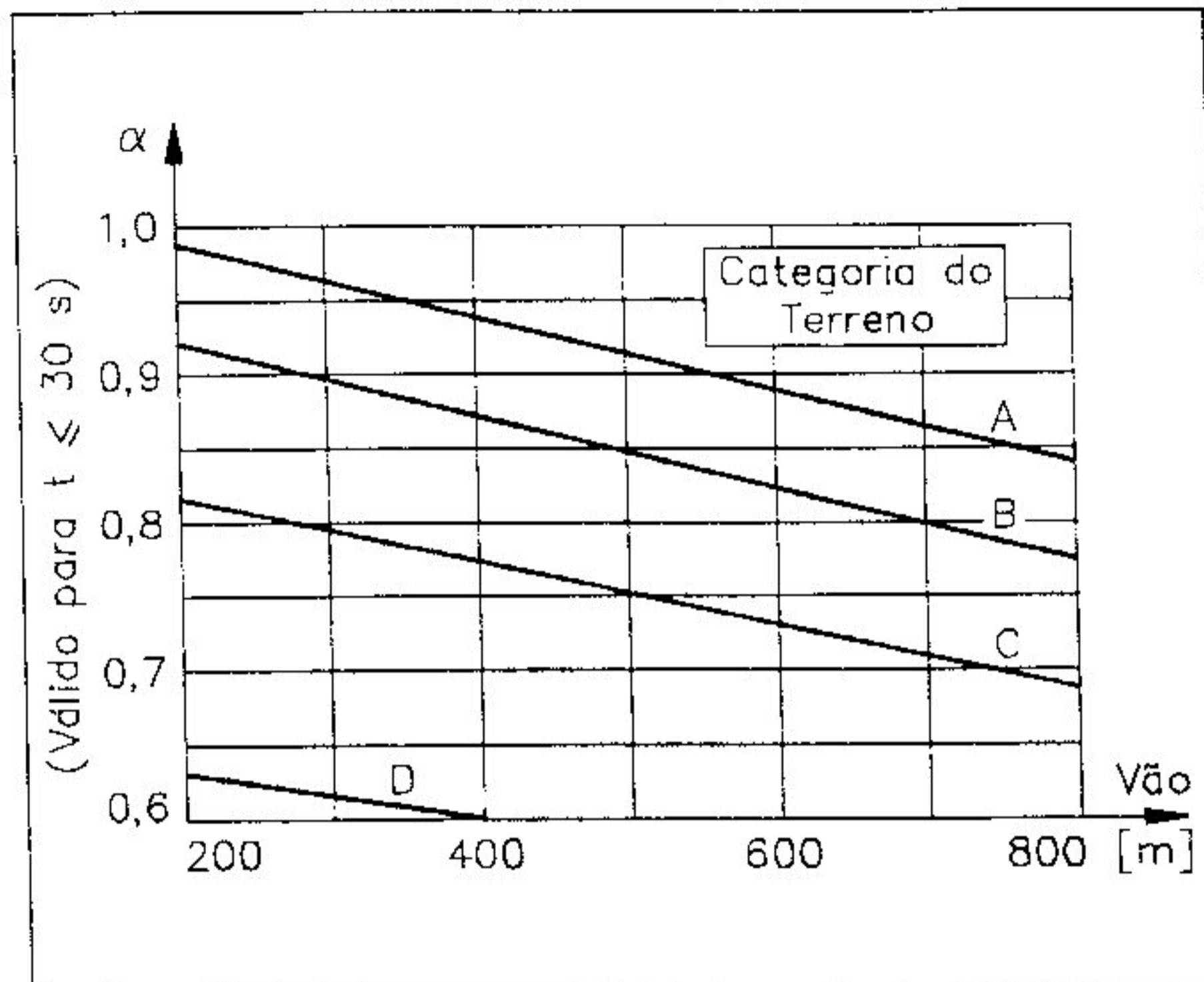


Figura 3.4
Fator de Efetividade α

d = Diâmetro do cabo.

V_v = Vão de vento do suporte que é igual a média aritmética dos vãos adjacentes ao suporte.

ϕ = Ângulo de incidência do vento em relação à direção da linha de transmissão ($\leq 90^\circ$).

3.3.2 Ação do Vento nas Cadeias de Isoladores

— O esforço devido à ação do vento nas cadeias de isoladores é aplicado

nos seus pontos de fixação na estrutura e pode ser calculado pela expressão:

3.4

$$A_i = q_0 \cdot C_{ai} \cdot S_i$$

onde:

C_{ai} = Coeficiente de arrasto do isolador, igual a 1,20.

S_i = Área da cadeia de isoladores, projetada ortogonalmente sobre um plano vertical.

3.3.3 Ação do Vento no Suporte — A determinação da ação do vento em um suporte é feita decompondo-o em painéis de comprimento inferior a 10 metros e aplicando as cargas nos centros de gravidade. A velocidade do vento é corrigida em função da altura do painel considerado. Nos suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular, esta ação pode ser calculada pela expressão:

3.5

$$A_t = q_0 \left(1 + 0,2 \sin^2 2\theta \right) \left(S_t \cdot C_{at} \cdot \sin^2 \theta + S_l \cdot C_{al} \cdot \cos^2 \theta \right)$$

onde:

θ = Ângulo de incidência do vento, medido conforme Figura 3.5.

S_t, S_l = Área líquida total de uma face projetada ortogonalmente sobre o plano vertical situado na face transversal (S_t) ou longitudinal (S_l).

C_{at}, C_{al} = Coeficiente de arrasto para a face transversal (C_{at}) ou longitudinal (C_{al}). Estes coeficientes dependem da relação entre as áreas líquida e bruta do contorno do painel e podem ser obtidos com a utilização da Figura 3.6.

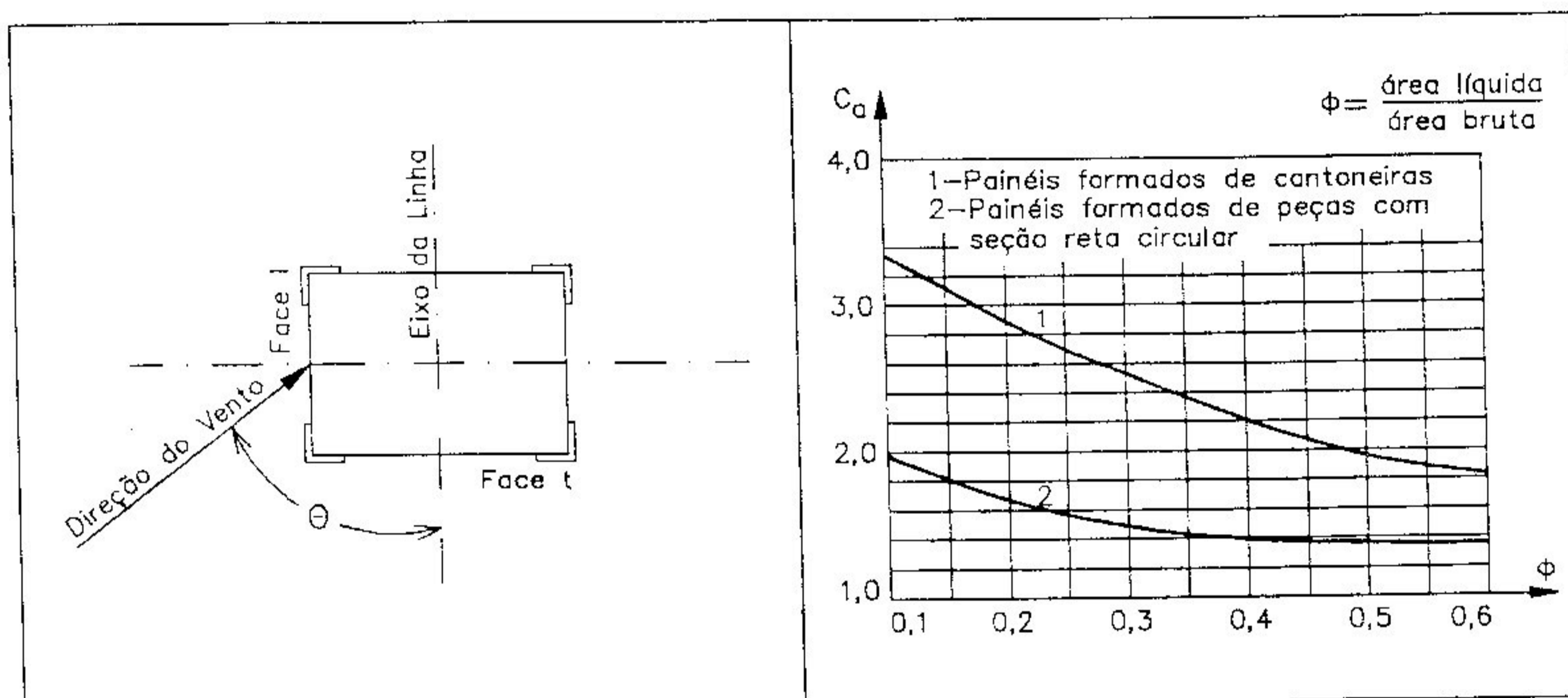


Figura 3.5
Ação do Vento sobre
um Tronco de Suporte

Figura 3.6
Coeficiente de Arrasto para
Painéis de Suportes Treliçados
(índice de área exposta)

3.4 Determinação das Cargas Atuantes

As cargas consideradas no cálculo de uma estrutura são de duas naturezas: normais, quando ocorrem frequentemente, e excepcionais, quando têm pequena probabilidade de ocorrer durante o período de vida útil da linha de transmissão.

O método de dimensionamento das estruturas utilizado no passado era o das tensões admissíveis. Neste método comparavam-se as tensões atuantes nos elementos estruturais, obtidas através de carregamentos nominais, com as tensões últimas divididas por um coeficiente de segurança, maior para cargas normais e menor para cargas excepcionais.

Atualmente, o método mais utilizado é o dos coeficientes das

ações, no qual multiplica-se cada tipo de ação nominal por um coeficiente de ponderação específico que dependerá da natureza da solicitação e da hipótese de cálculo a ser verificada.

As tensões calculadas por este processo são comparadas com as tensões últimas, obtidas através das condições de escoamento de seções transversais e de flambagem de barras, ou com tensões últimas divididas por um coeficiente de segurança no caso de dimensionamento das ligações.

São os seguintes, os esforços mecânicos que atuam em uma torre de linha de transmissão:

- Cargas devidas à pressão do vento exercida sobre a estrutura, cadeias de isoladores, cabos condutores e cabos pára-raios.
- Carga devida ao peso dos cabos, ferragens e da estrutura.
- Cargas em torres de ângulo, devidas à componente transversal da força de tração dos cabos.
- Cargas especiais que ocorrem durante a construção e manutenção.

3.4.1 Carga Devida ao Peso Próprio — Este carregamento pode ser obtido com a subdivisão da estrutura em painéis. O peso de cada painel (P_p) deve ser calculado e este valor multiplicado por um coeficiente de ponderação (K_g), de acordo com:

3.6

$$P_g = K_g \cdot P_p$$

São adotados valores diferentes deste coeficiente de ponderação ao serem consideradas as hipóteses de cálculo com vão gravante máximo ou com vão gravante mínimo. Definem-se como vão gravante máximo, a maior distância observada entre os pontos de tangência horizontal das duas catenárias adjacentes à uma determinada torre e como vão gravante mínimo, a menor distância observada para a situação análoga à anterior.

São recomendados os seguintes valores mínimos para o coeficiente de ponderação:

Para as hipóteses de cargas verticais máximas ou com vão gravante máximo	$K_g = 1,10$
Para as hipóteses de cargas verticais mínimas ou com vão gravante mínimo (reduzidas)	$K_g = 1,00$

3.4.2 Forças Devidas à Ação do Vento na Estrutura — A ação do vento na estrutura é determinada de acordo com a sequência dada no Item 3.3, aplicando-se o vento máximo em hipóteses de cálculo com cargas normais, isto é, de ocorrência freqüente durante a vida útil da linha.

Para as hipóteses de cálculo com cargas excepcionais, com baixa probabilidade de ocorrência durante o período de vida útil da linha de transmissão, é recomendada a aplicação de um vento igual ao médio máximo. Geralmente estas hipóteses são verificadas com o vento atuando perpendicularmente às faces da torre e a 45°.

Os coeficientes de ponderação adotados para a ação do vento nas estruturas variam de acordo com a especificação do cliente.

3.4.3 Cargas nos Pontos de Fixação dos Cabos

Cargas Verticais:

São cargas devidas ao peso dos cabos e acessórios.

3.7

$$V = (P_c \cdot N_{cf} \cdot V_g + P_{cf}) K_v$$

onde:

P_c = Peso do cabo condutor ou pára-raios por unidade de comprimento.

N_{cf} = Número de cabos por fase.

V_g = Vão gravante ou vão de peso da estrutura.

P_{cf} = Peso das cadeias de isoladores e das ferragens de fixação dos cabos.

K_v = Coeficiente de ponderação para as cargas verticais. A norma brasileira sugere um coeficiente de 1,15 para as hipóteses que utilizam o vão gravante máximo, e sugere 1,0 para as que utilizam o vão gravante mínimo.

Cargas Transversais:

São forças devidas à ação do vento nos cabos, cadeias de isoladores e ferragens e, também, às componentes transversais das forças de tração dos cabos nas torres de ângulo.

3.8

$$T = (q_0 \cdot N_{cf} \cdot \alpha \cdot d \cdot V_v \cdot \sin^2 \phi + 1,2 q_0 \cdot S_i) K_{t1} + T_0 \cdot \sin w\gamma \cdot K_{t2}$$

onde:

q_0 = Pressão de vento.

N_{cf} = Número de condutores por fase. No caso do cabo pára-raios geralmente é igual a unidade.

α = Fator de efetividade, que pode ser obtido através da Figura 3.4.

d = Diâmetro do cabo condutor ou pára-raios.

V_v = Vão de vento da torre.

φ = Ângulo de incidência do vento em relação à direção da linha.

S_i = Área da cadeia de isoladores projetada ortogonalmente sobre um plano vertical.

K_{t1} = Coeficiente de ponderação para as cargas transversais devidas à ação do vento.

T_0 = Valor máximo de tração no cabo durante a vida útil da linha.

$w = 1$ → Para torres em ângulo nas extremidades da linha.

$w = 0,5$ → Para torres em ângulo no meio da linha.

γ = Valor do ângulo de mudança de direção da linha na torre.

K_{t2} = Coeficiente de ponderação para as cargas transversais devidas à componente transversal da força de tração dos cabos.

Cargas Longitudinais:

São forças devidas ao rompimento de cabos ou à tração dos cabos condutor e pára-raios em torres de fim de linha.

3.9

$$L = z T_0 \cdot K_1$$

onde:

$z = 0,7$ → No caso de rompimento do cabo condutor em torres de suspensão. O valor do coeficiente representa a redução de tração no cabo provocada pela rotação da cadeia de isoladores na direção do cabo condutor.

$z = 1,0$ → No caso de rompimento do cabo pára-raios em torres de suspensão e ancoragem, no caso de rompimento do cabo condutor em torres de ancoragem e no caso de tração dos cabos em torres de fim de linha.

T_0 = Valor máximo de tração no cabo durante a vida útil da linha.

K_1 = Coeficiente de ponderação para as cargas longitudinais.

3.5 Definição das Hipóteses de Cálculo

A seguir apresenta-se uma sugestão para a definição das hipóteses básicas de cálculo mais utilizadas para uma torre de linha de transmissão [32].

- Hipótese Básica 1 — Consideramos os cabos intactos com vento máximo em qualquer direção; em geral, verificamos apenas nas direções transversal, longitudinal e a 45°.
- Hipótese Básica 2 — Consideramos a ruptura de um cabo pára-raios com aplicação do vento com velocidade reduzida. Quando a torre for projetada para suportar dois cabos pára-raios, teremos duas hipóteses: uma para o rompimento do cabo da esquerda e outra para o rompimento do cabo da direita.
- Hipótese Básica 3 — Consideramos a ruptura de um cabo condutor em qualquer posição com aplicação do vento com velocidade reduzida. Esta condição irá gerar um número de hipóteses igual ao número de condutores.
- Hipótese Básica 4 — Consideramos as cargas devidas ao lançamento dos cabos condutores e pára-raios.

Em torres utilizadas em linhas de circuito duplo, estas hipóteses básicas também deverão ser verificadas para as condições de um único circuito montado. Além disto, todas as hipóteses básicas anteriores deverão ser verificadas com as condições de carga vertical máxima e reduzida.

As condições de verificação da torre com carga vertical máxima e carga vertical reduzida se devem ao fato do cálculo ser feito para uma família de torres, o que exige a verificação do carregamento vertical nas situações de vão gravante máximo e mínimo. Em geral as solicitações máximas de tração nas fundações ocorrem com a condição de carga vertical reduzida.

Nas torres de ancoragem e de fim de linha, que utilizam mísulas retangulares ou trapezoidais, as cargas aplicadas nos pontos de fixação dos cabos são diferentes devido à desigualdade dos vãos adjacentes. Normalmente as cargas verticais e transversais são verificadas com a aplicação de dois terços da carga total em uma face da torre e o restante na outra.

Em regiões onde possa ocorrer a formação de gelo ao redor dos cabos, teremos que considerar o seu peso, e na determinação da ação do vento o

diâmetro do cabo deve ser majorado para levar em consideração a espessura do gelo envolvente.

Como se vê, o número de hipóteses de cálculo a ser considerado é bastante elevado vindo a exigir, portanto, uma sistematização para a sua correta identificação. Apresentamos, a seguir, uma sugestão para a designação de uma hipótese de cálculo genérica, utilizando um campo com 5 posições.

n	n	A	B	R
---	---	---	---	---

onde:

n = Número da hipótese básica de cálculo.

A = Indicador da localização do circuito a ser verificado, preenchido com:

E = hipótese com 1 circuito montado à esquerda.

D = hipótese com 1 circuito montado à direita.

. = hipótese com os dois circuitos montados.

B = Número do ponto de fixação do cabo rompido.

R = Indicador do vão gravante a ser utilizado, preenchido com:

Em branco = hipótese com vão gravante máximo.

R = hipótese com vão gravante reduzido.

3.6 Identificação e Designação dos Elementos Estruturais

3.6.1 Identificação das Subestruturas — As Figuras 3.7 e 3.8 mostram os dois tipos de torres de utilização mais freqüente em linhas de transmissão: a tronco-piramidal e a delta.

Cada torre pode ser dividida em duas partes: a cabeça e o tronco inferior. Estas partes, por sua vez, são compostas por subestruturas.

As subestruturas da cabeça da torre tipo tronco-piramidal, Figura 3.7, são os suportes dos cabos pára-raios, as mísulas e o tronco da cabeça.

As subestruturas da cabeça da torre tipo delta, Figura 3.8, são os suportes dos cabos pára-raios, as mísulas, a viga, as gambietas e o delta.

As subestruturas do tronco inferior, tanto para as torres tronco-piramidal como para as delta, são o tronco básico inferior, as extensões do corpo básico e as pernas.

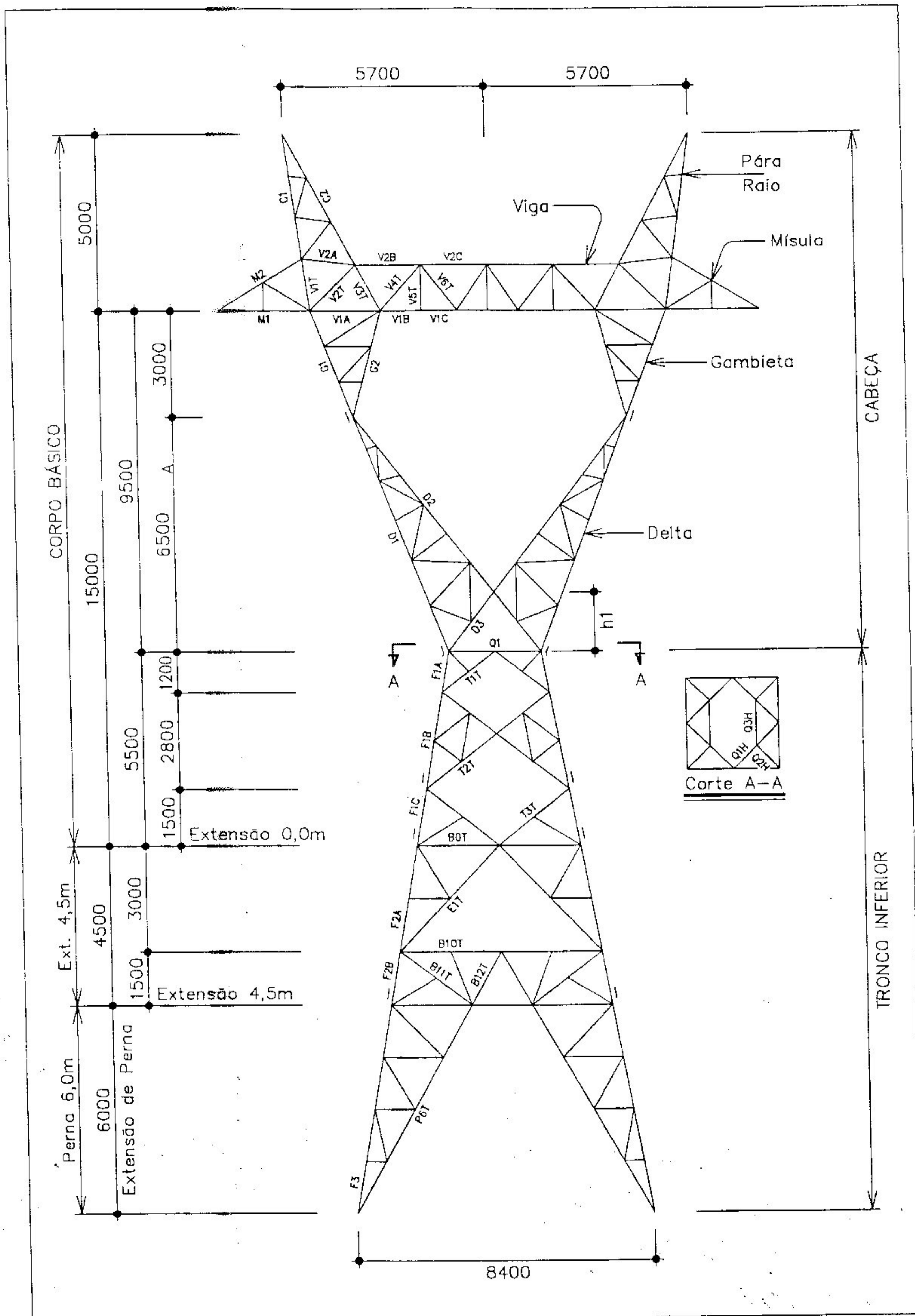


Figura 3.8
Torre Tipo
Delta

- Nas bases e pernas utilizadas numa extensão de corpo, usamos a mesma notação das diagonais do corpo básico.
- Nas barras de contorno das mísulas, utilizamos a mesma notação dos montantes. Para as outras barras da mísula, vide Figuras 4.2 a 4.4 do Capítulo 4, usamos:
 - H = Diagonal situada na face inferior da mísula.
 - S = Diagonal situada na face superior da mísula.
 - T = Diagonal situada na face transversal da mísula.
 - I = Diagonal situada em um treliçamento interno da mísula.
- Nas barras de contorno da estrutura suporte do cabo pára-raios, utilizamos a mesma notação dos montantes. Para as outras barras da estrutura suporte do cabo pára-raios, usamos:
 - T = Diagonal situada na face transversal.
 - L = Diagonal situada na face longitudinal.
 - Q = Diagonal situada em um quadro.
- Na viga das torres tipo delta, utilizamos para a corda (banzo) superior ou inferior a mesma notação dos montantes. Para outras barras, usamos:
 - H = Diagonal situada na face inferior da viga.
 - S = Diagonal situada na face superior da viga.
 - T = Diagonal situada na face transversal da viga.
 - I = Diagonal situada em um treliçamento interno da viga.
- Na gambieta e no delta, utilizamos para as barras do contorno a mesma notação dos montantes. Para outras barras, usamos:
 - T = Diagonal situada na face transversal.
 - L = Diagonal situada na face longitudinal externa.
 - D = Diagonal situada na face longitudinal interna.
 - I = Diagonal situada em um treliçamento interno.
- No quadro da base inferior do delta, utilizamos:
 - T = Barra do contorno da face transversal.
 - L = Barra do contorno da face longitudinal.
 - H = Diagonal interna do quadro.

4

Análise das Torres pelo Processo Clássico

A análise das estruturas para suporte de linhas de transmissão é normalmente feita utilizando-se o processo clássico ou o método dos deslocamentos. No processo clássico, objeto deste capítulo, a análise é feita empregando-se os processos de equilíbrio dos nós, das seções e de *Cremona*. Este processo, anteriormente empregado nas memórias de cálculo, é utilizado hoje em cálculos de ante-projetos e na verificação expedita dos resultados obtidos pelos programas de computador que utilizam o método dos deslocamentos.

Neste trabalho limitar-nos-emos a fazer a análise elástica linear em primeira ordem, ou seja, admitiremos que as barras são linearmente elásticas e que o equilíbrio seja estudado na configuração indeformada da estrutura. Além disso só abordaremos a análise estática.

A seguir apresentaremos diversas expressões deduzidas pelo processo clássico e que se aplicam às barras das subestruturas de torre anteriormente definidas.

4.1 Cálculo do Suporte do Cabo Pára-Raios

A Figura 4.1 mostra as subestruturas do suporte dos cabos pára-raios normalmente utilizadas em torres do tipo tronco-piramidal. No processo clássico as forças normais nas barras das subestruturas são calculadas através do equilíbrio dos nós, resultando as seguintes expressões:

Suporte Tipo (a)	Fôrça Normal na Barra (C1)	4.1
$F_{C1} = \pm \frac{C1 F_x}{2 L_1} \pm \frac{C1 F_y}{2 T_1} - \frac{C1 F_z}{4 h_1}$		

Suportes Tipos (b) e (c)	Força Normal na Barra (C1)	4.2
--------------------------	----------------------------	-----

$$F_{C1} = \pm \left\{ \frac{h_2 \bar{C1}}{2 T_1 h_1} F_{y1} - \frac{h_2 \bar{C1}}{2 T_1 h_1} \times \left(\frac{T_1 h_2 - 2 h_1 b_2 - T_1 h_1}{2 h_1 b_2 + T_1 h_2 - T_1 h_1} \right) F_{y2} \right\} +$$

$$- \left\{ \frac{(2 b_1 - T_1) [-T_1 h_2 + h_1 (2 b_1 + T_1)]}{4 T_1 h_1 [T_1 h_2 + h_1 (2 b_1 - T_1)]} \bar{C1} F_{z1} - \frac{b_2 / T_1 - 0,5}{2 h_1} \bar{C1} F_{z2} \right\} +$$

$$- \left\{ \frac{0,5 + b_3 / T_1}{2 h_1} \bar{C1} F_{z3} + \frac{0,5 - b_4 / T_1}{2 h_1} \bar{C1} F_{z4} \right\}$$

Suportes Tipos (b) e (c)	Força Normal na Barra (C2)	4.3
--------------------------	----------------------------	-----

$$F_{C2} = \pm \frac{h_2 \bar{C2} F_{y1}}{h_1 b_1 + (h_2 - h_1) T_1 / 2} + \frac{(b_1 - T_1 / 2) \bar{C2} F_{z1}}{h_1 b_1 + (h_2 - h_1) T_1 / 2}$$

Suportes Tipos (b) e (c)	Força Normal na Barra (C3)	4.4
--------------------------	----------------------------	-----

$$F_{C3} = \pm \frac{\bar{C3} F_{x1}}{L_1} \pm \frac{(h_2 - h_1) \bar{C3} F_{y1}}{2 h_1 b_1 + (h_2 - h_1) T_1} - \frac{b_1 \bar{C3} F_{z1}}{2 h_1 b_1 + (h_2 - h_1) T_1}$$

Suportes Tipos (b) e (c)	Força Normal na Barra (C1Q)	4.5
--------------------------	-----------------------------	-----

$$F_{C1Q} = \pm \left\{ \frac{b_1 / T_1 - 1}{2 n L_1} \bar{C1Q} F_{x1} - \frac{b_2 / T_1 - 1}{2 n L_1} \bar{C1Q} F_{x2} \right\} \pm$$

$$\pm \left\{ \frac{b_3 / T_1 - 1}{2 n L_1} \bar{C1Q} F_{x3} - \frac{b_4 / T_1 - 1}{2 n L_1} \bar{C1Q} F_{x4} \right\}$$

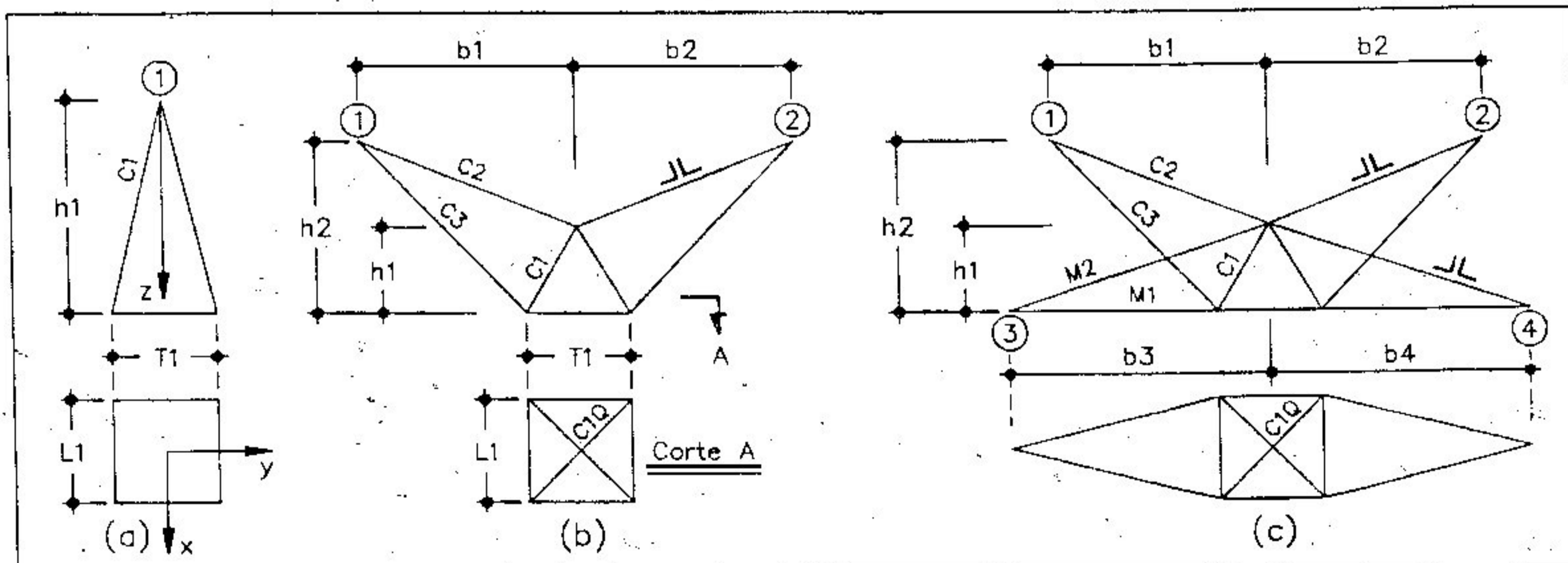


Figura 4.1

Tipos de Subestruturas de Suporte dos Cabos Pára-Raios

Suporte Tipo (c)	Força Normal na Barra (M1)	4.6
$F_{M1} = \pm \frac{\overline{M1} F_{x3}}{L_1} \pm \frac{\overline{M1} F_{y3}}{2b_3 - T_1} - \frac{\overline{M1} b_3 F_{z3}}{2h_1 (b_3 - T_1/2)}$		

Suporte Tipo (c)	Força Normal na Barra (M2)	4.7
$F_{M2} = \frac{\overline{M2} F_{z3}}{h_1}$		

Sempre com referência à Figura 4.1, o significado dos termos das sete últimas expressões é o seguinte:

$$\overline{C1} = \text{Comprimento da barra (C1)} = \sqrt{h_1^2 + 0,25 T_1^2 + 0,25 L_1^2}$$

$$\overline{C2} = \text{Comprimento da barra (C2)} = \sqrt{b_1^2 + (h_2 - h_1)^2}$$

$$\overline{C3} = \text{Comprimento da barra (C3)} = \sqrt{h_2^2 + (b_1 - T_1/2)^2 + 0,25 L_1^2}$$

$$\overline{C1Q} = \text{Comprimento da barra (C1Q)} = \sqrt{T_1^2 + L_1^2}$$

$$\overline{M1} = \text{Comprimento da barra (M1)} = \sqrt{(b_3 - T_1/2)^2 + 0,25 L_1^2}$$

$$\overline{M2} = \text{Comprimento da barra (M2)} = \sqrt{b_3^2 + h_1^2}$$

L_1 = Largura da torre na face longitudinal, no nível inferior do suporte do cabo pára-raios.

T_1 = Mesma definição anterior só que para a face transversal.

h_i e b_i = Projeções verticais e horizontais mostradas na Figura 4.1.

F_{xi} , F_{yi} e F_{zi} = Cargas aplicadas no ponto de fixação do cabo ($i = 1, 2, 3$ e 4) nas direções (x), (y) e (z) respectivamente.

n = Número de diagonais do quadro.

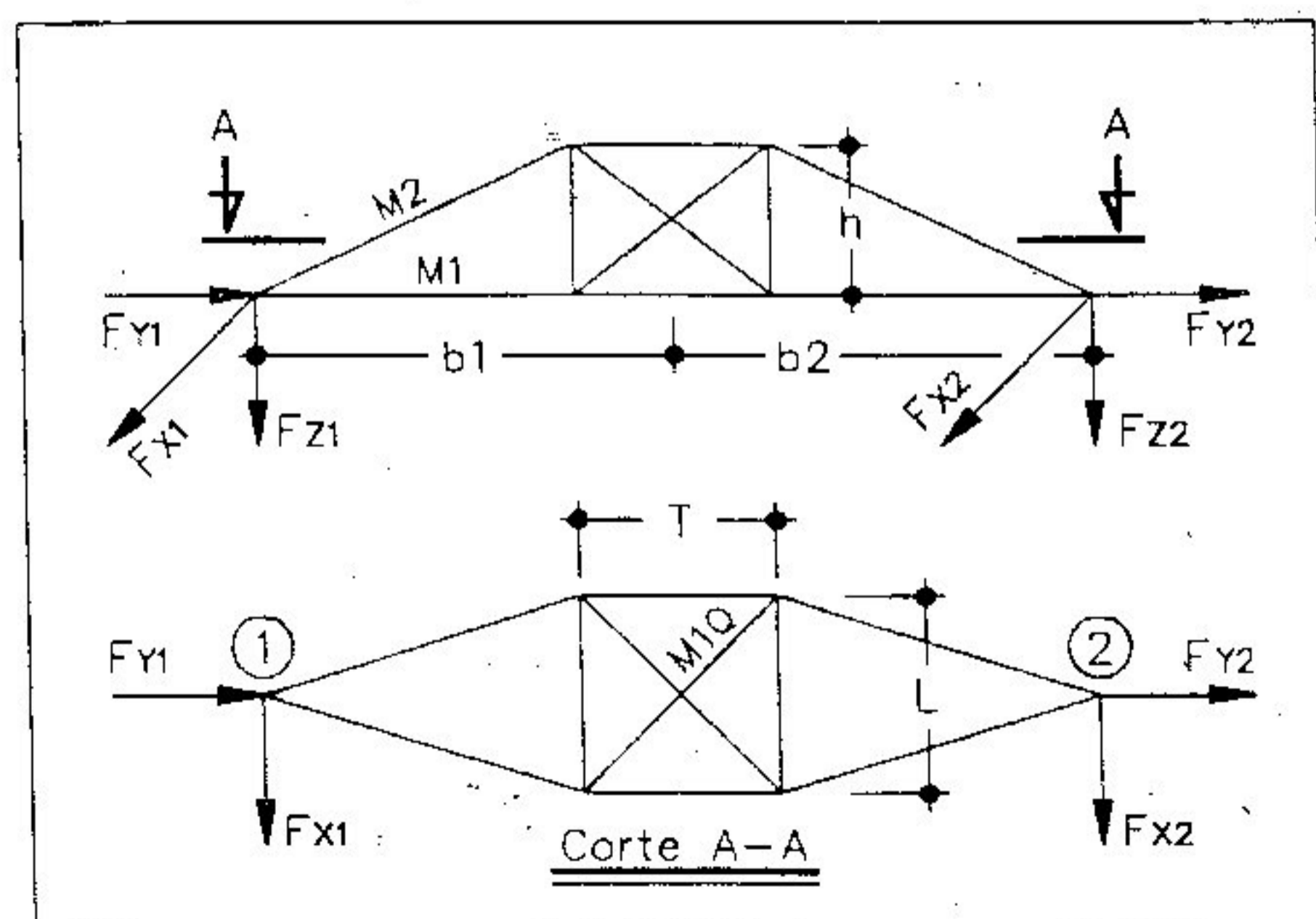


Figura 4.2
Mísula Triangular

4.2 Cálculo das Mísulas

As mísulas são as subestruturas utilizadas para o suporte dos cabos condutores. A mísula triangular, mostrada na Figura 4.2, é empregada nas torres de

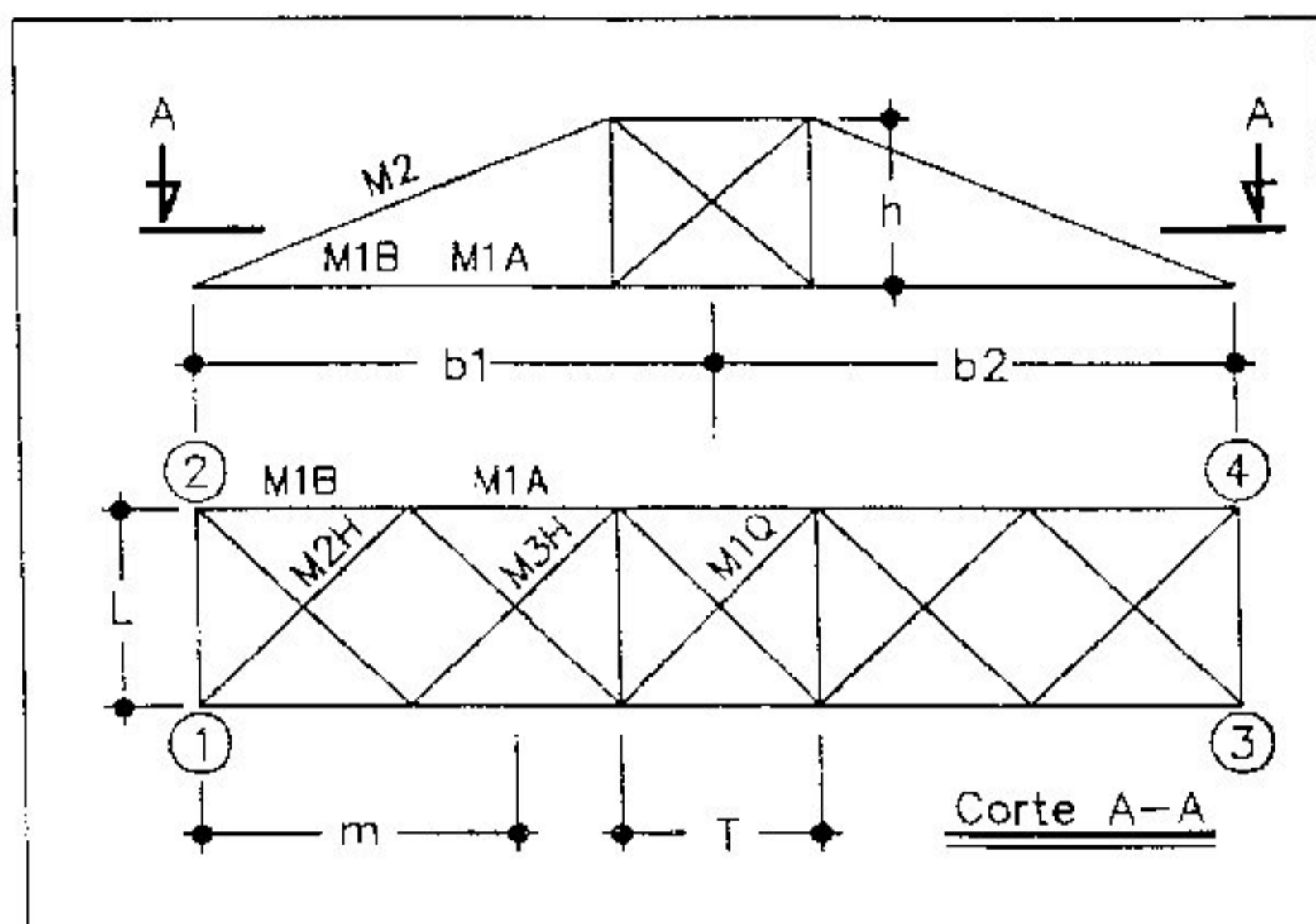


Figura 4.3
Mísula Retangular

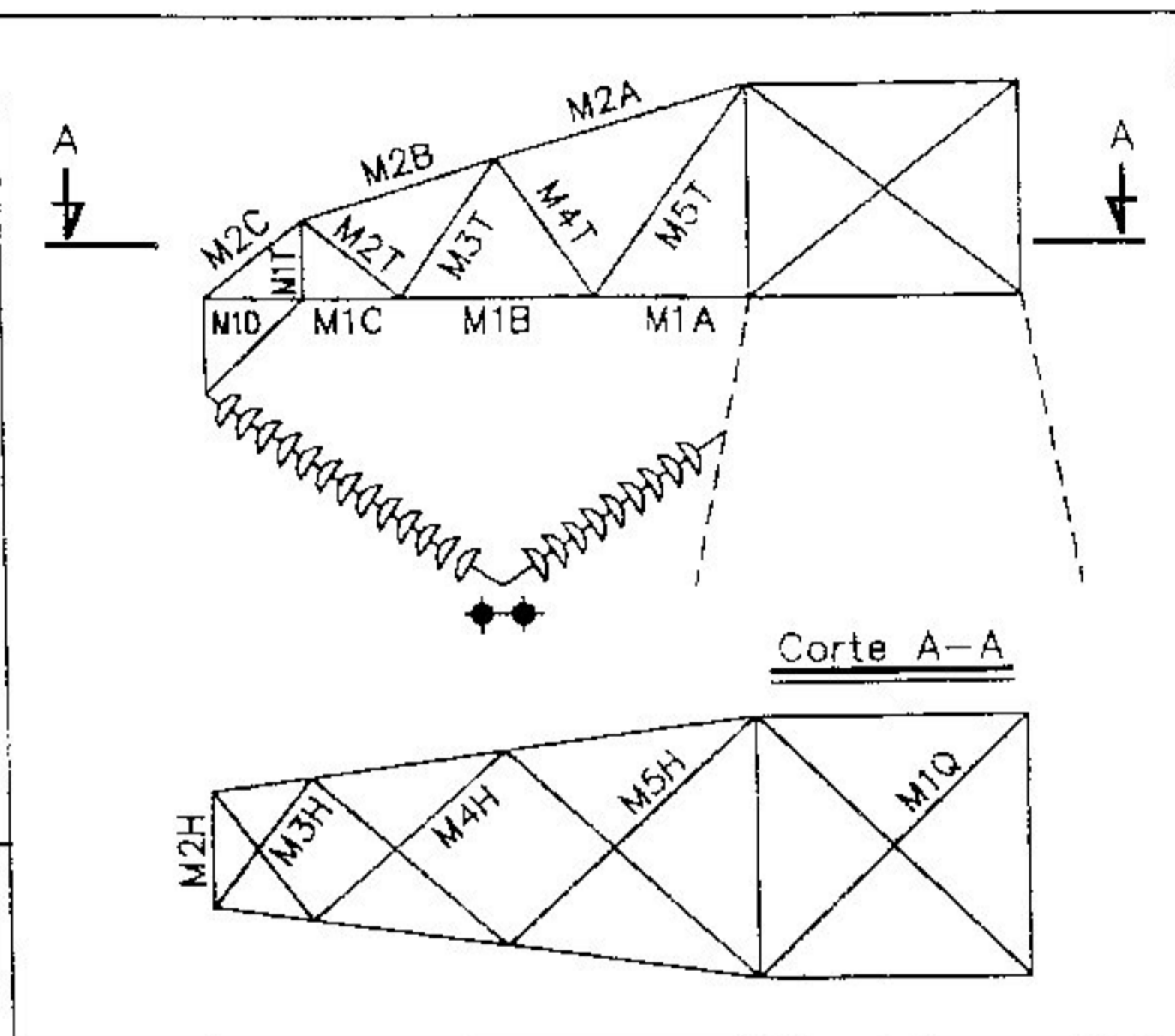


Figura 4.4
Mísula Trapezoidal

suspensão e nas torres de pequeno ângulo. Já para as torres de fim de linha, de amarração ou de grandes ângulos a forma mais usual é a retangular ou a trapezoidal, vide Figuras 4.3 e 4.4. As expressões das forças normais nas barras das mísulas são:

Mísulas Triangulares	Força Normal na Barra (M1)	4.8
----------------------	----------------------------	-----

$$F_{M1} = \pm \frac{\overline{M1}}{2(b_1 - T/2)} F_y - \frac{\overline{M1}}{2h} F_z \pm \frac{\overline{M1}}{L} F_x$$

Mísulas Triangulares	Força Normal na Barra (M2)	4.9
----------------------	----------------------------	-----

$$F_{M2} = \frac{\overline{M2} F_z}{2h}$$

Mísulas Triangulares	Força Normal na Barra (M1Q)	4.10
----------------------	-----------------------------	------

$$F_{M1Q} = \pm \frac{\overline{M1Q}}{2nL} \left(\frac{b_1}{T} - 1 \right) (F_{x1} - F_{x2})$$

Mísulas Retangulares	Força Normal na Barra (M1)	4.11
----------------------	----------------------------	------

$$F_{M1} = - \frac{(b_1 - T/2)}{h} F_{z1} \pm F_{y1} \pm \frac{(F_{x1} + F_{x2}) m}{L}$$

Mísulas Retangulares	Força Normal na Barra (M2)	4.12
----------------------	----------------------------	------

$$F_{M2} = \frac{\sqrt{h^2 + (b_1 - T/2)^2}}{h} F_{z1}$$

Mísulas Retangulares	Força Normal na Barra (M1Q)	4.13
----------------------	-----------------------------	------

$$F_{M1Q} = - \left(\frac{b_1}{T} - 1 \right) \cdot \frac{F_{x1} + F_{x2}}{n \sqrt{2}} + \left(\frac{b_2}{T} - 1 \right) \cdot \frac{F_{x3} + F_{x4}}{n \sqrt{2}} - \left| \frac{F_{y1} + F_{y3} - F_{y2} - F_{y4}}{2 n \sqrt{2}} \right|$$

Mísulas Retangulares	Força Normal na Barra (M2H)	4.14
----------------------	-----------------------------	------

$$F_{M2H} = \frac{\overline{M2H}}{n \cdot L} (F_{x1} + F_{x2})$$

Sempre com referência às Figura 4.2 e 4.3, o significado dos termos das 7 últimas expressões é o seguinte:

$$\overline{M1} = \text{Comprimento da barra (M1)} = \sqrt{(b1 - T/2)^2 + (L/2)^2}$$

$$\overline{M2} = \text{Comprimento da barra (M2)} = \sqrt{h^2 + (b1 - T/2)^2 + (L/2)^2}$$

$$\overline{M1Q} = \text{Comprimento da barra (M1Q)} = \sqrt{T^2 + L^2}$$

$$\overline{M2H} = \text{Comprimento da barra (M2H)}.$$

b_1, b_2, T, L, h, m = Conforme Figuras 4.2 e 4.3.

F_{xi}, F_{yi} e F_{zi} = Cargas aplicadas no ponto de fixação do cabo ($i = 1, 2, 3$ e 4) nas direções (x), (y) e (z) respectivamente.

n = Número de diagonais do painel.

4.3 Cálculo das Diagonais

Devido à sua relevância nas torres de linhas de transmissão, apresentaremos a dedução da equação genérica para o cálculo da força normal atuante em uma diagonal [32].

Seja, portanto, a Figura 4.5 na qual supomos que a carga aplicada (F) esteja dividida igualmente nas duas faces e que as forças (F_d) nas diagonais sejam uma de tração e a outra de compressão.

Aplicando o método das seções, para a condição de momento nulo no ponto (O) de interseção do prolongamento dos montantes, resulta:

$$F_d = \frac{F}{2} \cdot \frac{h}{n h_1}$$

Da Figura 4.5, obtemos:

$$\tan(\gamma) = \frac{h}{a_r/2} \quad \therefore h = a_r \frac{\tan(\gamma)}{2}$$

$$\sin(\alpha_1) = \frac{h_1}{m} \quad \therefore h_1 = m \cdot \sin(\alpha_1)$$

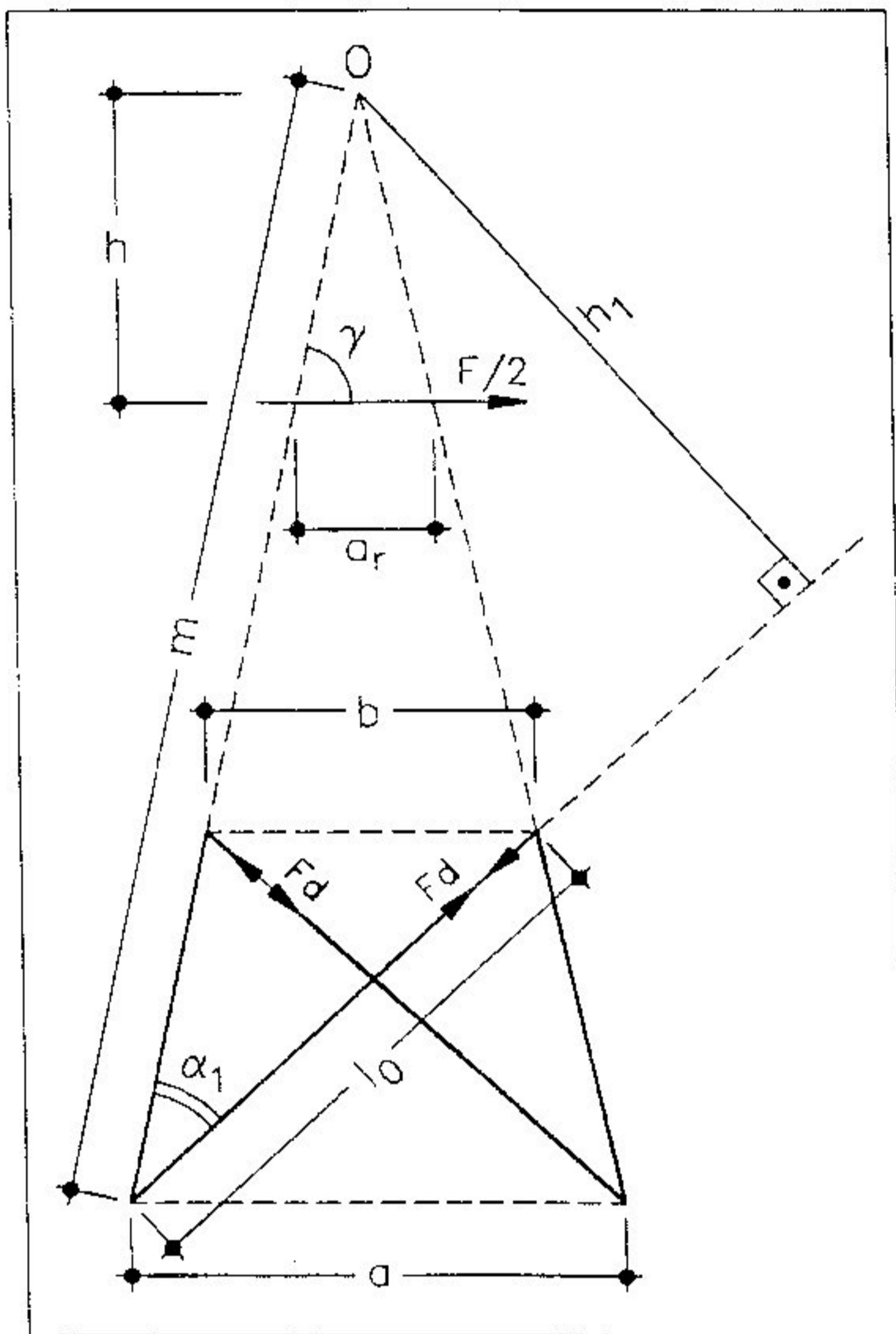


Figura 4.5
Esforços nas Diagonais

Aplicando o teorema do seno e dividindo-se o valor de h por h_1 , vem:

$$\frac{b}{\sin(\alpha_1)} = \frac{l_0}{\sin(\gamma)}$$

$$\frac{h}{h_1} = \frac{a_r \cdot \tan(\gamma)}{2m \cdot \sin(\alpha_1)} = \frac{a_r \cdot l_0}{a \cdot b}$$

Substituindo na equação de F_d este último valor (h/h_1) teremos, finalmente, a equação utilizada para o cálculo da força normal na diagonal:

4.15

$$F_d = \frac{F \cdot a_r}{2n \cdot a \cdot b / l_0}$$

4.3.1 Diagonais da Cabeça da

Torre Tronco-Piramidal — Vamos apresentar a seguir as expressões

utilizadas no cálculo das forças normais atuantes nas diagonais da cabeça da torre tronco-piramidal e nas diagonais do tronco inferior. Tais expressões têm como base a equação (4.15) e as Figuras 4.5 e 4.6.

Diagonais da Face Transversal

4.16

 $F_d =$

$$= \frac{\sum F_{yi} \cdot a_{ri}}{2nab/l_0} +$$

$$+ \frac{\sum F_{zj} \left[\frac{C_{yj}}{|C_{yj}|} \left(|C_{yj}| - \frac{a}{2} \right) \right] \frac{b}{h}}{2nab/l_0} + \frac{2 \left(\sum F_{yi} C_{xi} - \sum F_{xi} C_{yi} \right) T_1 T_2}{L_1 T_2 + T_1 L_2}$$

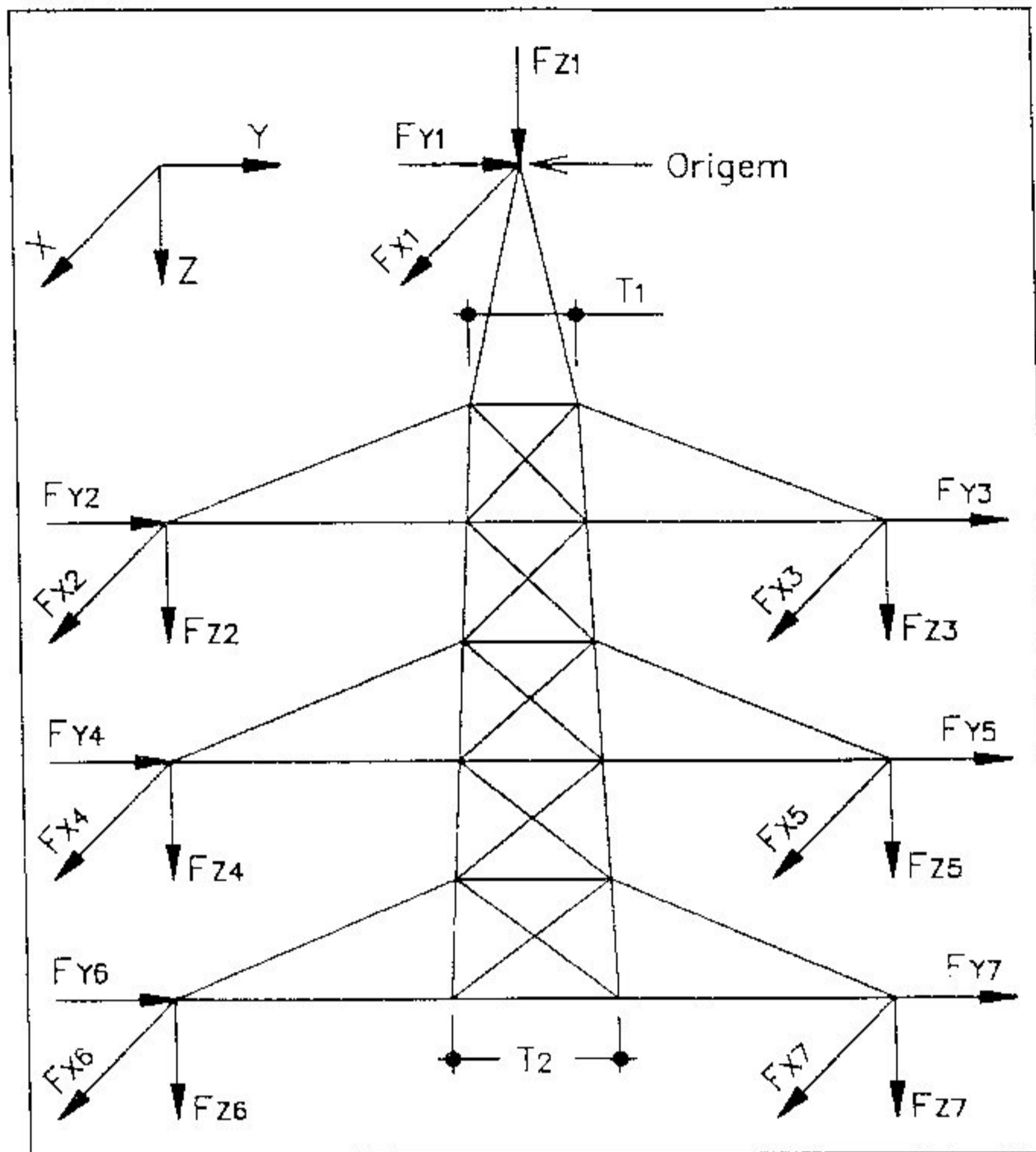


Figura 4.6
Diagonais do Tronco da Cabeça

onde:

L_1, L_2 = Distâncias análogas a (T1) e (T2), porém, medidas na face longitudinal.

C_{xi}, C_{yi} e C_{zi} = Coordenadas dos pontos de aplicação das cargas.

n = Número de diagonais do painel.

F_{xi}, F_{yi} e F_{zi} = Forças externas aplicadas no nó genérico (i) nas direções (x), (y) e (z) respectivamente.

a_{ri} = Distância medida na horizontal entre os montantes ou entre seus prolongamentos no nível do ponto de aplicação da força F_{yi} .

h = Altura da mísula considerada.

Ainda com referência à expressão (4.16):

- A primeira parcela corresponde ao efeito do esforço cortante na diagonal. São consideradas todas as cargas horizontais (F_{yi}) do topo da torre até o nível superior da diagonal a ser calculada.
- A segunda parcela corresponde ao desequilíbrio provocado pelas cargas verticais aplicadas nas mísulas e é utilizada somente em diagonais situadas em painéis de suporte de mísulas. O índice (j) refere-se aos nós situados nestas mísulas.
- A terceira parcela corresponde ao esforço resultante do momento de torção provocado pelas cargas transversais e longitudinais, cujo vetor está aplicado no eixo vertical que passa pelo centro de gravidade da torre.

Diagonais da Face Longitudinal

4.17

$$F_d = \frac{\sum F_{xi} a_{ri}}{2 n a b / l_0} + \frac{2 (\sum F_{yi} C_{xi} - \sum F_{zi} C_{yi}) L_1 L_2}{L_1 T_2 + L_2 T_1} \frac{1}{2 n a b / l_0}$$

Na expressão (4.17), a primeira parcela corresponde ao efeito do esforço cortante na diagonal e a segunda parcela corresponde ao esforço resultante do momento de torção provocado pelas cargas transversais e longitudinais.

4.3.2 Diagonais do Tronco Inferior — No cálculo das forças normais nas diagonais do tronco inferior utilizamos expressões semelhantes àquelas das diagonais da cabeça de uma torre tronco-piramidal. Tais forças serão sempre calculadas pela expressão simbólica:

$$F_d = \frac{\sum R_{ar}}{2 n a b / l_0}$$

nos limitando a determinar, em cada caso, o valor de $(\sum R_{ar})$. É oportuno observar que este valor corresponde ao numerador $(F \cdot ar)$ da expressão (4.15) anteriormente deduzida, já que a expressão acima é uma generalização desta.

Diagonais da Face Transversal	4.18
$\sum R_{ar} = \sum F_{yi} a_{ri} + \sum F_{zi} C_{yi} 2 \tan(\theta_t) + \frac{2 \left(\sum F_{yi} C_{xi} - \sum F_{xi} C_{yi} \right) T_2 T_3}{L_2 T_3 + L_3 T_2}$	

Com a expressão (4.18), ao ser composto o valor de (F_d) , a primeira, segunda e terceira parcelas corresponderão respectivamente às forças normais provocadas pelo esforço cortante, desequilíbrio das cargas verticais e torção.

Diagonais da Face Longitudinal	4.19
$\sum R_{ar} = \sum F_{xi} a_{ri} + \sum F_{zi} C_{xi} 2 \tan(\theta_l) + \frac{2 \left(\sum F_{yi} C_{xi} - \sum F_{xi} C_{yi} \right) L_2 L_3}{L_2 T_3 + L_3 T_2}$	

Nas expressões (4.18) e (4.19), para o cálculo das forças normais nas diagonais do tronco inferior, foram empregadas as seguintes variáveis:

F_{xi} , F_{yi} e F_{zi} = Forças externas aplicadas no nó genérico (i), nas direções dos eixos globais (x), (y) e (z), respectivamente.

C_{xi} , C_{yi} e C_{zi} = Coordenadas do nó genérico (i).

a_{ri} = Distância medida na horizontal entre os montantes ou entre seus prolongamentos no nível do ponto de aplicação das forças (F_{yi}) e (F_{xi}) .

n = Número de diagonais do painel.

T_1, L_1, T_2, L_2, T_3 e L_3 = Aberturas da torre nas faces transversal (T) e longitudinal (L), respectivamente no topo, na cintura e no nível inferior da torre mais alta.

(a) e (b) = Distâncias medidas na horizontal entre os montantes nos níveis inferior e superior do painel da diagonal em estudo.

l_0 = Comprimento da diagonal em estudo.

θ_t, θ_l = ângulos de inclinação da torre, medidos em relação ao eixo (z), nas faces transversal e longitudinal, respectivamente.

4.4 Cálculo dos Montantes

Os montantes (F_i), Figura 4.7, de uma torre de linha de transmissão são as barras do contorno externo da estrutura e, em geral, são seus elementos mais solicitados. Para a determinação da força normal em um montante utilizamos o método das seções, através do qual obtemos a seguinte expressão geral:

Força Normal num Montante

4.20

$$F_{MON} = \sum \frac{F_{yi} h_1}{2 a_1 \cos(\theta_t)} + \sum \frac{F_{xi} h_2}{2 a_2 \cos(\theta_l)} + \sum \frac{F_{zi}}{4} + \frac{PP}{4} + F_{des}$$

onde:

F_{xi}, F_{yi} e F_{zi} = Forças externas aplicadas no nó genérico (i) nas direções dos eixos globais (x), (y) e (z), respectivamente.

pp = Peso próprio de todos os elementos estruturais situados acima do montante a ser calculado.

h_1 e h_2 = Braços de alavanca em relação aos polos (O1) e (O2) conforme indicado na Figura 4.7.

a_1 e a_2 = Distâncias horizontais entre os montantes no nível dos polos nas faces transversal e longitudinal, respectivamente.

θ_t e θ_l = Ângulos de inclinação da torre, medidos em relação ao eixo (z), nas faces transversal e longitudinal, respectivamente.

F_{des} = Força normal provocada pelo desequilíbrio das cargas verticais; pode ser calculada através das expressões (4.21) e (4.22).

Montantes nas Mísulas

4.21

$$F_{des} = \frac{|-F_{zi}(-C_{yi} + T/2) + F_{z2}(-C_{y2} + T/2)|}{4T}$$

Montantes do Tronco Inferior

4.22

$$F_{des} = \left| \frac{-\sum F_{zi} C_{yi}}{2 a_1 \cos(\theta_1)} \right| + \left| \frac{\sum F_{zi} C_{xi}}{2 a_2 \cos(\theta_1)} \right|$$

Nas expressões (4.21) e (4.22), além de (T) e (L) que estão indicados na Figura 4.7, os parâmetros (Cxi), (Cyi) e (Czi) são as coordenadas do nó genérico (i).

A Figura 4.7 ilustra um exemplo com o montante (F1) situado nas mísulas e o montante (F2) no tronco inferior.

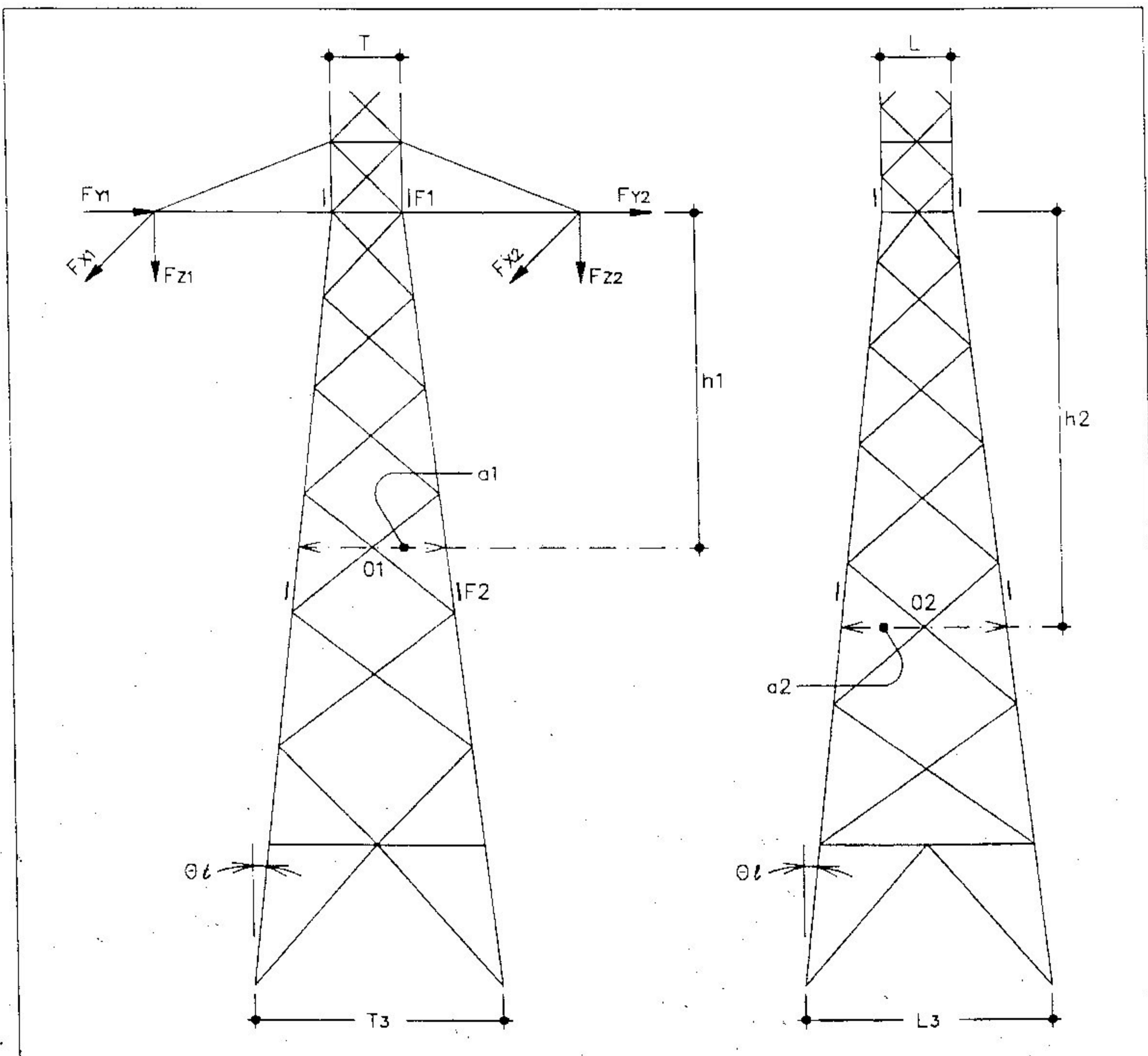


Figura 4.7

Montantes nas Mísulas e no Tronco Inferior

4.5 Cálculo das Barras das Bases e das Pernas

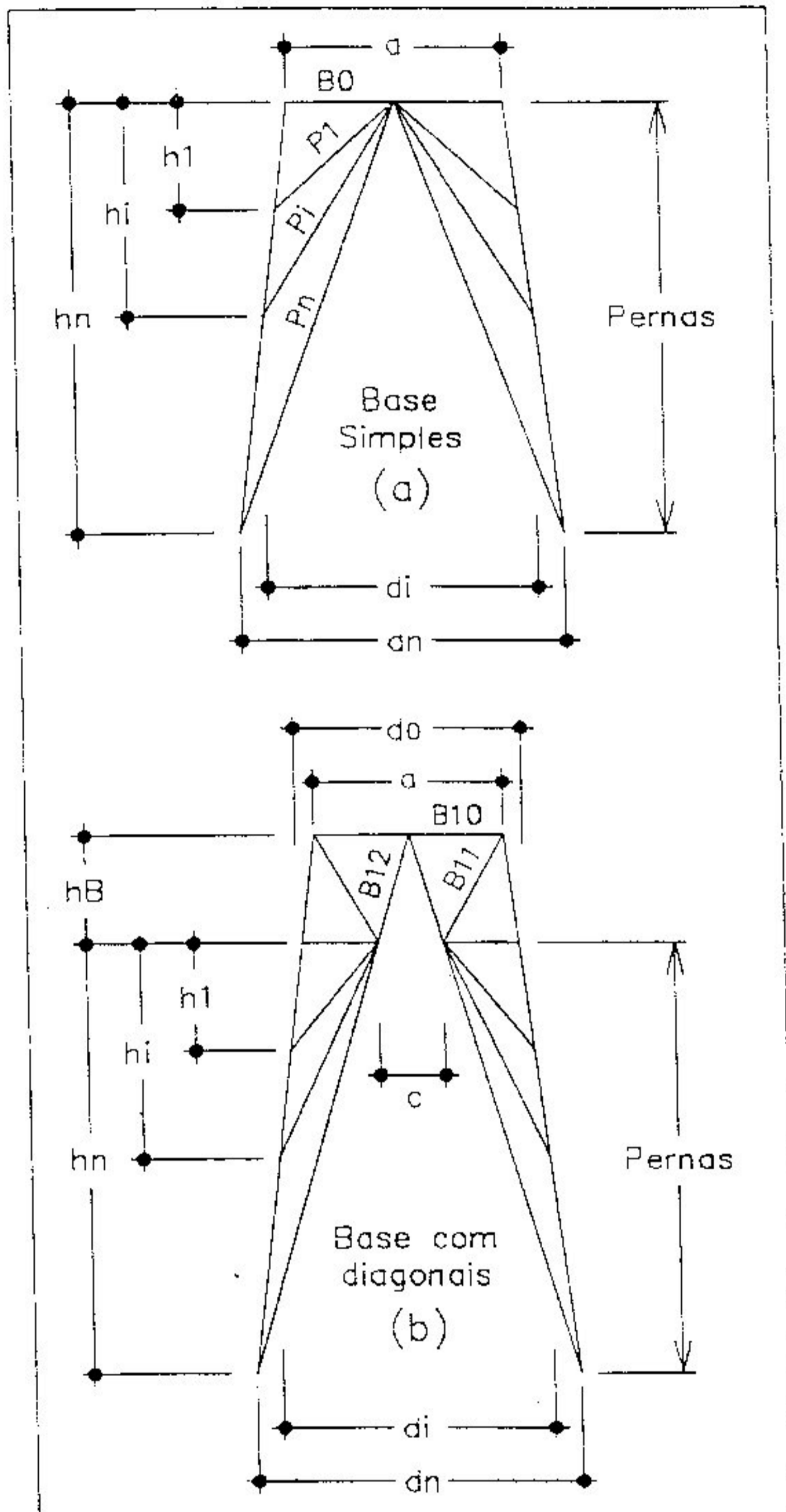


Figura 4.8
Bases e Pernas das Torres

No cálculo de torres pelo processo clássico, o processo gráfico de *Cremona* é, em geral, a ferramenta preferida para a determinação das forças normais nas barras das bases e pernas. Neste trabalho optamos pela utilização de expressões analíticas que conduzem aos mesmos resultados daqueles obtidos pelo processo gráfico.

4.5.1 Base Simples — A Figura 4.8 (a) mostra uma base simples na qual as forças normais nas barras são calculadas com as seguintes expressões:

Barra Horizontal (B_0) 4.23

$$F_{B_0} = \frac{\sum R_{ar}}{4a} \quad \text{ou} \quad F_{B_0} = 0$$

onde $(\sum R_{ar})$ é o valor obtido conforme as expressões (4.18) e (4.19) para as faces transversal e longitudinal.

Observamos, todavia, que (F_{B_0}) será igual a zero quando as diagonais do painel imediatamente superior estiverem com suas emendas no centro da base.

Iésima Perna (P_i) 4.24

$$F_{P_i} = \sum R_{ar} \frac{h_n l_{pi}}{a(h_n d_i + h_i d_n)}$$

onde $(\sum R_{ar})$ é definido como no caso da barra horizontal.

4.5.2 Base com Diagonais — A Figura 4.8 (b) mostra uma base com diagonais, na qual as forças normais nas barras são calculadas com as expressões a seguir apresentadas.

Barra Horizontal (B10)

Quando as diagonais do painel imediatamente superior estiverem com suas emendas nas extremidades da base.

4.25

$$F_{B10} = \frac{\sum R_{ar} (h_B + h_n) c}{4 h_B a d_n}$$

Barra Horizontal (B10)

Quando as diagonais do painel imediatamente superior estiverem com suas emendas no centro da viga.

4.26

$$F_{B10} = \sum R_{ar} \left| \frac{h_B d_n - (h_B + h_n) c}{4 a h_B d_n} \right|$$

Diagonal da Extremidade (B11)

4.27

$$F_{B11} = \sum R_{ar} \left| \frac{h_B d_n - (h_B + h_n) c}{h_B d_n} \right| \frac{l_{b11}}{2 a (d_0 - c)}$$

Diagonal do Centro (B12)

4.28

$$F_{B12} = \sum R_{ar} \frac{(h_B + h_n) l_{b12}}{2 a d_n h_B}$$

Iésima Perna (P_i)

4.29

$$F_{P_i} = \sum R_{ar} \left\{ \frac{(h_B + h_n) (h_B d_0 + h_i d_0 - h_B d_i)}{a (d_0 - c) \times [h_i d_n (h_i + h_B) + h_i d_i (h_n + h_B)]} \right\} l_{pi}$$

Nas expressões anteriores, para o cálculo das forças normais nas barras das bases e pernas, empregamos as seguintes variáveis:

l_{b11} , l_{b12} , l_{pi} = Comprimentos das barras (B11), (B12) e (P_i), respectivamente.

a , c , h_B , h_i , h_n , d_0 , d_i e d_n = Conforme Figura 4.8.

4.6 Cargas nas Fundações

As cargas nas fundações são, em geral, calculadas para a menor e a maior extensão de torre com as seguintes combinações de pernas:

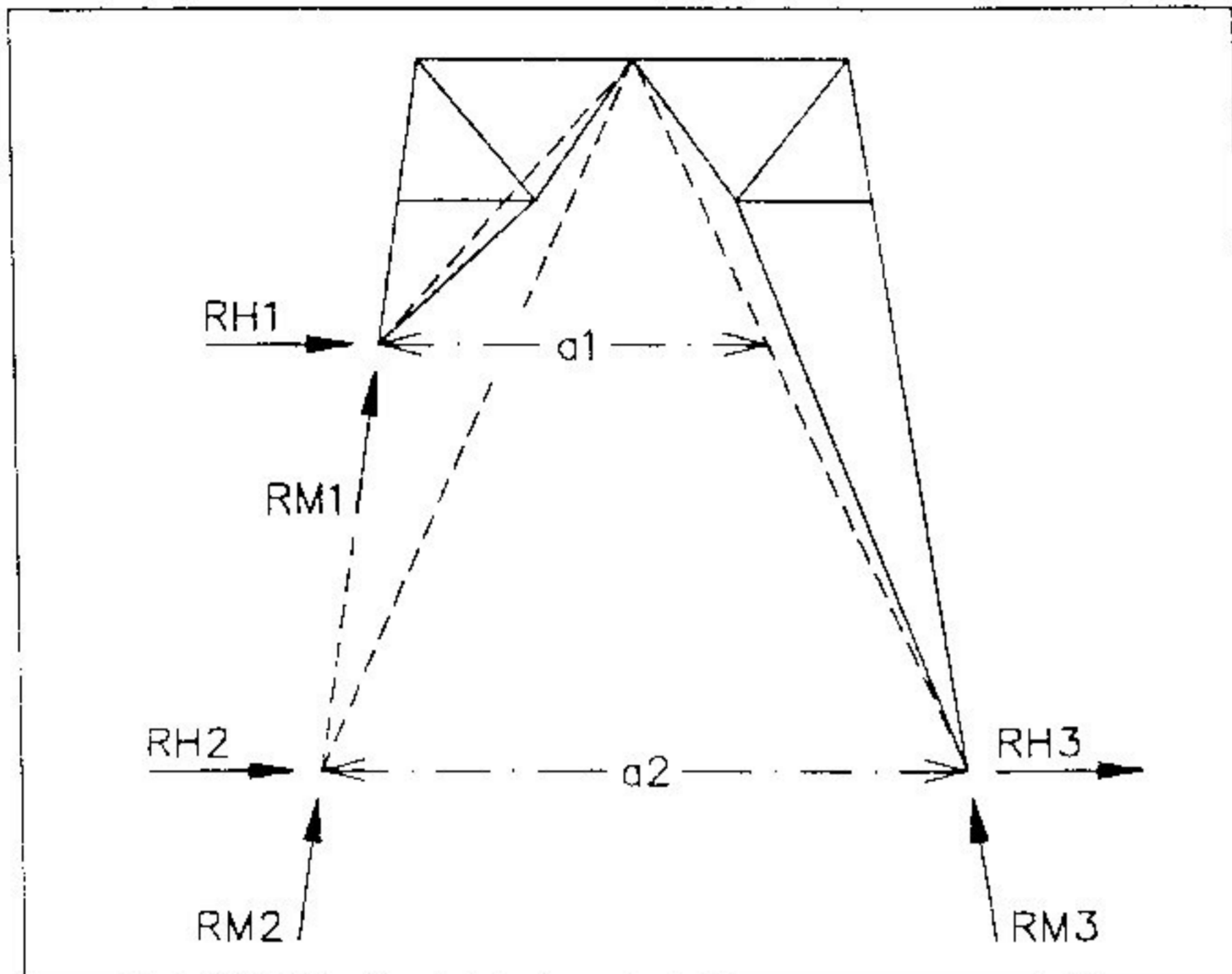


Figura 4.9
Reações nas Fundações

- Extensão com as quatro pernas menores.
- Extensão com as quatro pernas maiores.
- Extensão com outras combinações de pernas maiores e menores.

No cálculo das cargas nas fundações devemos determinar, para cada perna, as reações horizontais (transversal e longitudinal) e a reação na direção do montante. Para isto podemos utilizar as seguintes expressões:

Reação na Direção do Montante

4.30

$$R_{M2} = \frac{\sum F_{y1} h_1}{2 a_2 \cos(\theta_1)} + \frac{\sum F_{x1} h_2}{2 a_2 \cos(\theta_1)} + \frac{\sum F_{z1}}{4} + \frac{pp}{4} + F_{des}$$

Reações Horizontais

4.31

$$RH1 = \frac{\sum R_{ar}}{4 a1}$$

onde:

$\sum R_{ar}$ = Para determinar a reação horizontal transversal usar o valor obtido pela expressão (4.18). Para determinar a reação horizontal longitudinal usar o valor obtido pela expressão (4.19).

As variáveis utilizadas na expressão (4.30) foram definidas no Item (4.4).

Para a determinação das cargas nas fundações basta, agora, inverter os sentidos das reações calculadas. A metodologia que acabamos de apresentar é utilizada para o cálculo das fundações metálicas. No entanto, para as fundações em concreto armado é mais usual as cargas serem calculadas segundo o sistema cartesiano.

5

Dimensionamento das Barras e Ligações

Neste Capítulo serão fornecidos os elementos necessários para o dimensionamento das barras e ligações de estruturas treliçadas para as torres de linhas de transmissão conforme a norma *Guide For Design of Steel Transmission Towers* da ASCE (*American Society of Civil Engineers*) [4], a mais utilizada no Brasil.

5.1 Barras à Compressão

Na verificação à compressão trabalhamos com ações de cálculo onde o dimensionamento é feito comparando-se a tensão de cálculo atuante no elemento estrutural com a tensão crítica de flambagem [4], conforme a expressão:

5.1

$$f_a = \frac{N_d}{A_g} \leq F_a$$

onde:

f_a = Tensão de cálculo devido a N_d .

N_d = Solicitação de cálculo de compressão determinada multiplicando-se as ações nominais atuantes pelos respectivos coeficientes de ponderação.

A_g = Área bruta da seção transversal.

F_a = Tensão crítica de flambagem obtida das curvas da ASCE.

5.1.1 Tensão Crítica de Flambagem — As expressões para a tensão crítica de flambagem (F_a) para barras comprimidas são as seguintes:

Flambagem no Regime Inelástico

5.2

$$F_a = \left[1 - 0,5 \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_{cr} \quad \text{para} \quad \frac{KL}{r} \leq C_c$$

Flambagem no Regime Elástico

5.3

$$F_a = \frac{\pi^2 \cdot E}{(KL/r)^2} \quad \text{para} \quad \frac{KL}{r} > C_c$$

sendo o significado dos termos, para ambas expressões:

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_{cr}}}$$

E = Módulo de elasticidade longitudinal do aço.

KL/r = Índice de esbeltez efetivo.

A tensão (F_{cr}) depende da compacidade (w/t) da cantoneira, vide Figura 5.1, que é um indicador de possibilidade de flambagem local. Para a determinação de (F_{cr}) utilizamos os dois valores limites — (w/t)₁ e (w/t)₂ — da compacidade e a curva de flambagem local de um elemento não enrijecido, como mostrado na Figura 5.2. A determinação de (F_{cr}) será feita conforme seu enquadramento numa das três situações seguintes (unidades em kgf e cm):

Cantoneiras Compactas Sem Possibilidade de Falha por Flambagem Local

5.4

$$F_{cr} = F_y \quad \text{para} \quad w/t \leq (w/t)_1$$

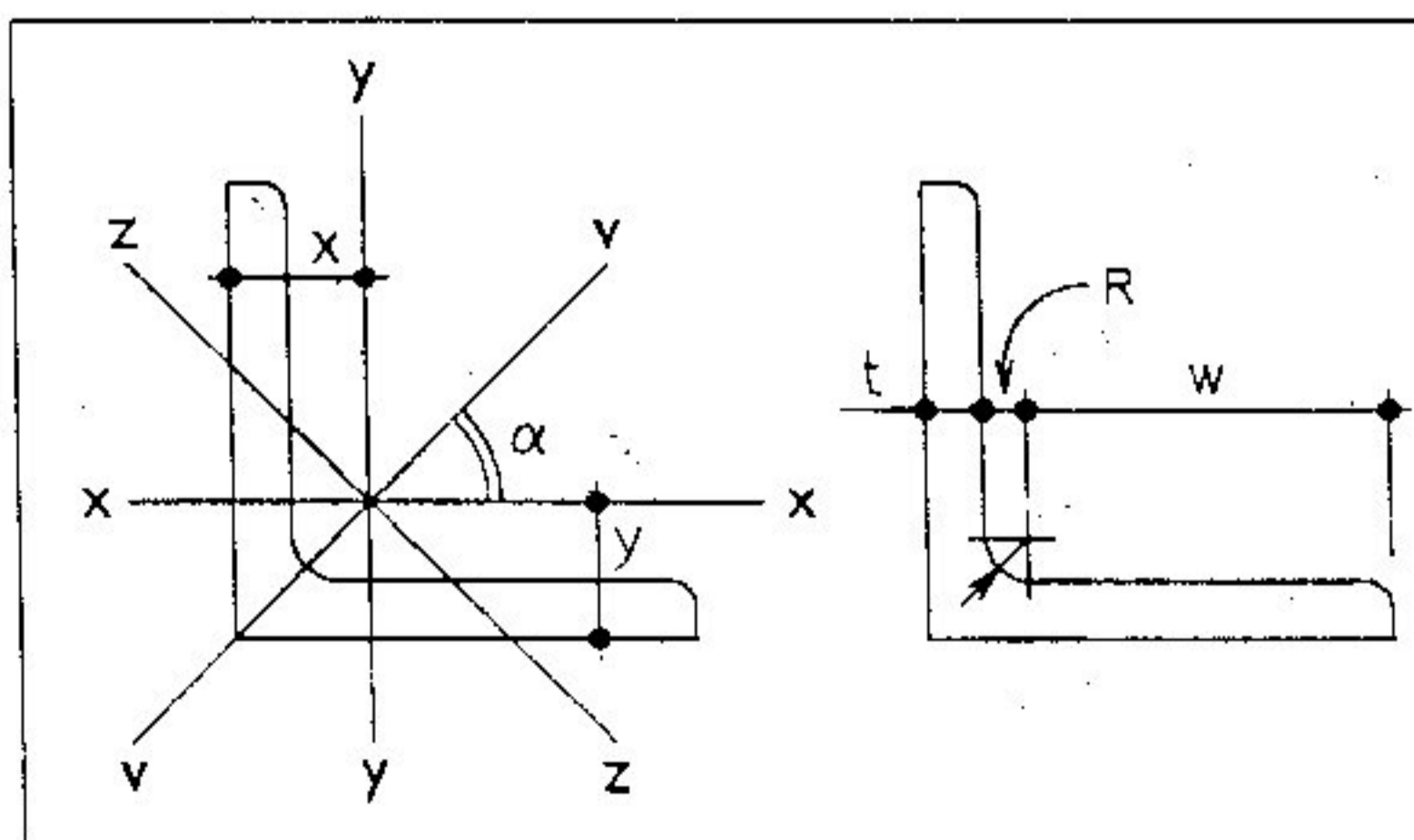


Figura 5.1
Cantoneira Laminada
de Abas Iguais

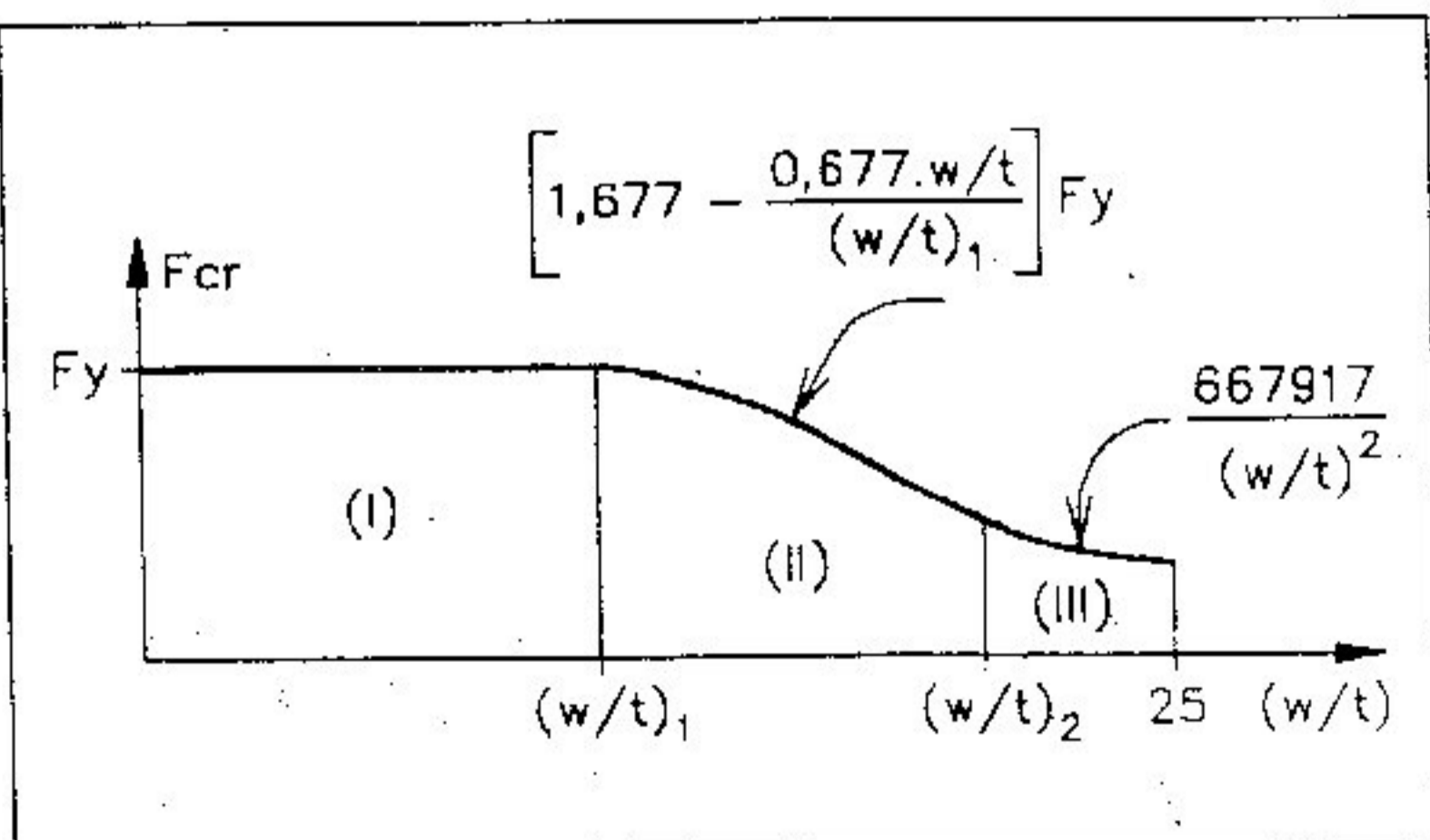


Figura 5.2
Tensões Críticas para a
Flambagem Local

Cantoneiras com Possibilidade de Flambagem Local no Regime Inelástico 5.5

$$F_{cr} = \left[1,677 - \frac{0,677 w/t}{(w/t)_1} \right] F_y \quad \text{para} \quad (w/t)_1 < w/t \leq (w/t)_2$$

Cantoneiras Com Possibilidade de Flambagem Local no Regime Elástico 5.6

$$F_{cr} = \frac{667\,917}{(w/t)^2} \quad \text{para} \quad (w/t)_2 < w/t \leq 25$$

sendo o significado dos termos, para as três últimas expressões:

$$(w/t)_1 = \frac{670,76}{\sqrt{F_y}} \quad (w/t)_2 = \frac{1207,37}{\sqrt{F_y}}$$

F_y = Tensão limite de escoamento do aço.

5.1.2 Valores Limites — A norma da ASCE recomenda a utilização das seguintes espessuras mínimas no projeto das estruturas:

Cantoneiras	3,17 mm
Chapas	4,76 mm

A citada norma exige ainda que, sendo (L) o comprimento de flambagem de uma barra e (r) o seu raio de giração, o índice de esbeltez (L / r) fique limitado a:

Montantes	$L / r \leq 150$
Outras Barras Carregadas à Compressão	$L / r \leq 200$
Barras Redundantes (descarregadas)	$L / r \leq 250$
Barra Solicitadas Somente à Tração	$L / r \leq 500$

5.1.3 Índice de Esbeltez Efetivo (K L / r) — A norma da ASCE fornece seis curvas de flambagem para o dimensionamento das peças comprimidas. Para a determinação destas curvas deve-se definir o índice de esbeltez efetivo (K L / r), observando a seguinte terminologia:

- Carga Centrada — quando a ligação da extremidade de uma cantoneira for feita com a utilização de ambas as abas.
- Carga Excêntrica — quando a ligação da extremidade de uma cantoneira for feita com a utilização de apenas uma das abas.
- Ligação Rotulada — quando feita com apenas um único parafuso.
- Ligação Semi-Engastada — quando feita com dois ou mais parafusos, a um elemento que possa ser considerado suficientemente rígido.

Barras com $L/r \leq 120$		
Situação	KL/r	Curva
Cargas centradas em ambas as extremidades.	L/r	1
Carga centrada em uma extremidade e excêntrica na outra.	$30 + 0,75 L/r$	2
Cargas excêntricas em ambas as extremidades.	$60 + 0,50 L/r$	3

Barras com $L/r > 120$		
Situação	KL/r	Curva
Ligações rotuladas em ambas as extremidades.	L/r	4
Ligação semi-engastada em uma extremidade e rotulada na outra.	$28,6 + 0,762 L/r$	5
Ligações semi-engastadas em ambas as extremidades.	$46,2 + 0,615 L/r$	6

5.2 Barras à Tração

O processo de dimensionamento de barras tracionadas utilizado pela norma ASCE [4] — segundo a qual o estado limite considerado é o de escoamento na área líquida da seção transversal da cantoneira — é diferente daqueles adotados em outras normas [1], [2] — nas quais os estados limites considerados são os de escoamento na área bruta e de ruptura na área líquida. A verificação a ser feita é:

5.7

$$f_t = \frac{N_d}{A_e} \leq F_y$$

onde:

f_t = Tensão de cálculo à tração.

N_d = Solicitação última de cálculo de tração, determinada multiplicando-se as cargas nominais atuantes pelos respectivos coeficientes de ponderação.

$A_e = A_n \cdot C_t$ = Área líquida efetiva.

A_n = Área líquida da seção transversal, definida pela expressão (5.8).

C_t = Coeficiente de redução da área líquida.

F_y = Limite de escoamento do aço.

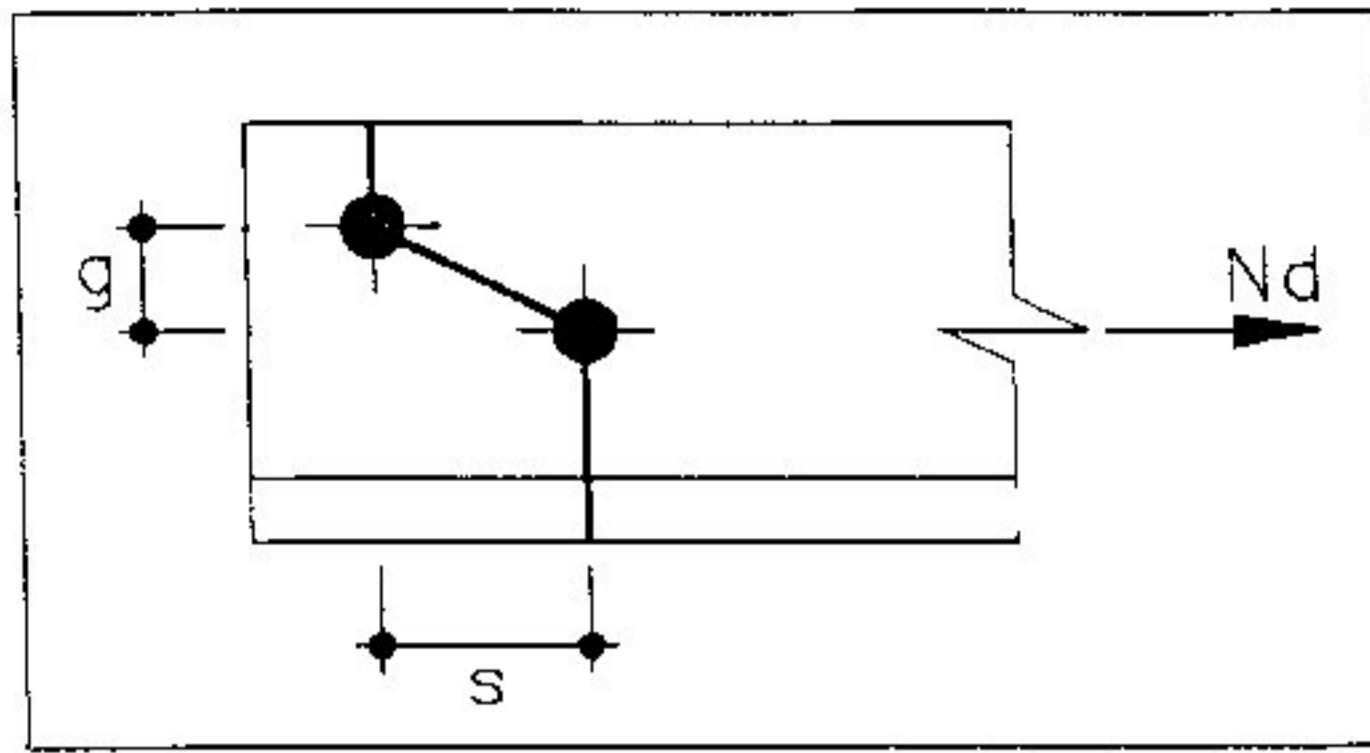


Figura 5.3
Área Líquida de Cantoneiras

A área líquida é função da linha de ruptura da seção transversal, Figura 5.3, e pode ser determinada através da expressão:

$$A_n = A_g - \sum t \cdot d_f + \sum t \cdot s^2 / 4g \quad 5.8$$

onde:

A_g = Área bruta da seção transversal.

t = Espessura da cantoneira.

d_f = Diâmetro do furo = Diâmetro nominal do parafuso mais um acréscimo de 1/8" para furos feitos através de punção e 1/16" para os outros.

g = Espaçamento entre dois furos na direção perpendicular à força de tração (Nd).

s = Espaçamento entre dois furos na direção paralela à força de tração (Nd).

O coeficiente (C_t) é um número adimensional que leva em conta a concentração de tensões que aparecem em cantoneiras ligadas somente por uma aba. Os valores recomendados são:

Ligação feita nas duas abas	$C_t = 1,00$
Ligação feita em uma aba com 1 parafuso	$C_t = 0,75$
Ligação feita em uma aba com mais de 1 parafuso	$C_t = 0,85$

5.3 Barras Redundantes (Descarregadas)

A procura da solução mais econômica para as estruturas de torre nos leva a utilizar barras de contraventamento, também chamadas de barras redundantes. Elas não absorvem esforços em análise de primeira ordem e são introduzidas com a finalidade de reduzir o comprimento de flambagem de barras carregadas. O processo de dimensionamento é simples e, em geral, consiste em fazermos três verificações [29]:

- Assegurar que a esbeltez não exceda o valor de $(KL/r \leq 250)$. Como consequência desta limitação da esbeltez, cada cantoneira passa a ter um

comprimento máximo de utilização para o raio de giração mínimo e outro para o raio de giração médio.

Na prática do dia-a-dia, estes comprimentos são calculados para as diversas cantoneiras e colocados em forma de tabelas.

- Verificar a barra redundante com uma carga vertical de 100 kg (peso de um operário multiplicado por um coeficiente de segurança) aplicada na pior situação.

Na prática do dia-a-dia, são utilizadas tabelas de cantoneiras com as projeções horizontais máximas permitidas para os diversos aços disponíveis.

- Verificar a barra redundante para um esforço de compressão em geral correspondente a 2,5% da força da barra a ser contraventada.

5.4 Ligações

Nas ligações de cantoneiras nas torres para linhas de transmissão são normalmente utilizados parafusos especificados conforme a norma ASTM A-394.

A Figura 5.4 mostra os detalhes de um parafuso e a Figura 5.5 ilustra os detalhes construtivos para os tipos de ligações convencionais [4], [32], [29] e [30].

5.4.1 Resistências Nominais — Conforme o tipo de aço, os parafusos apresentam as seguintes resistências nominais à tração (F_u) e ao cisalhamento (F_{vu}):

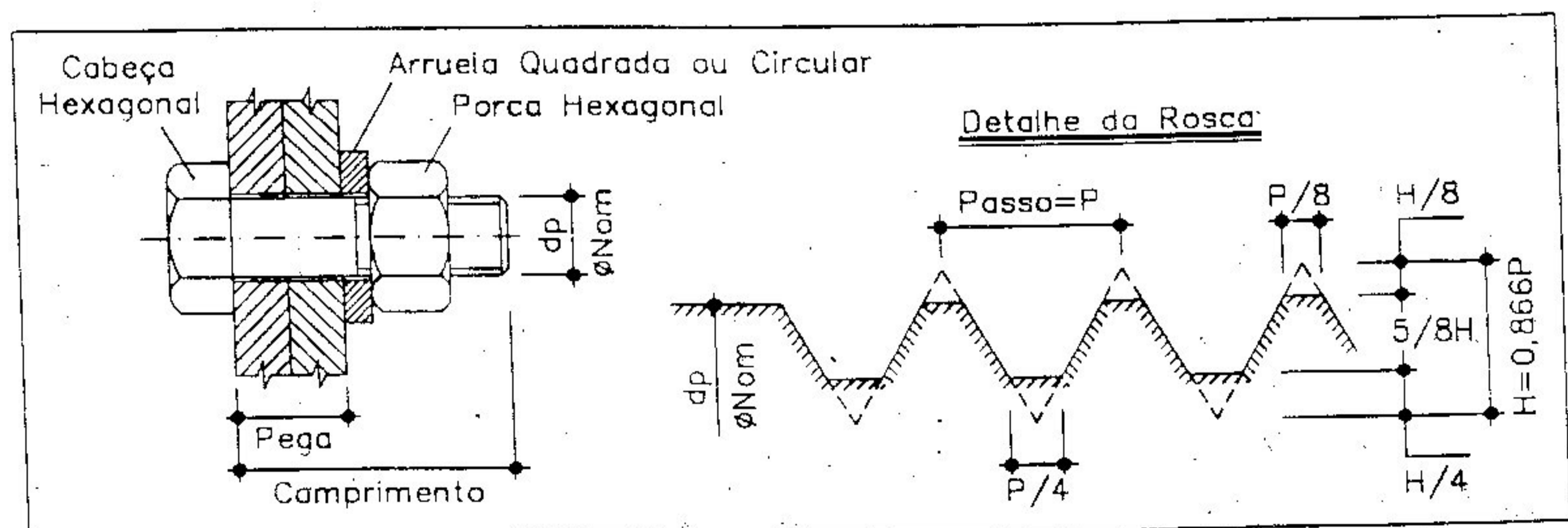


Figura 5.4
Parafusos para Torres de Linhas de Transmissão

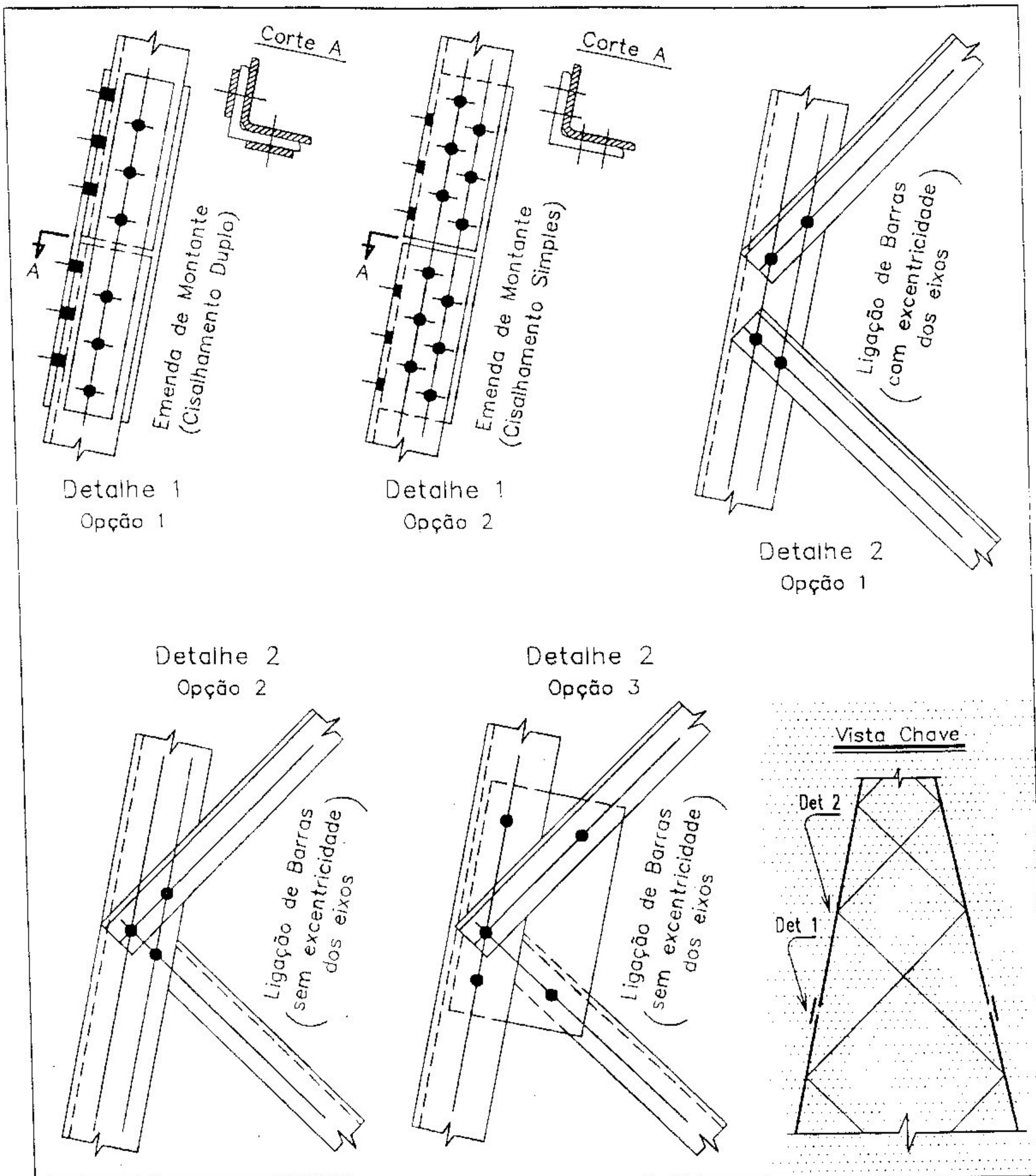


Figura 5.5

Detalhes Construtivos das Ligações de Montantes e Diagonais

■ Parafuso comum galvanizado, de aço de baixo ou médio carbono, sem tratamento térmico — ASTM A 394 Tipo 0:

Tração $F_u = 5202 \text{ kgf} / \text{cm}^2$

Cisalhamento na rosca $F_{vu} = 3880 \text{ kgf} / \text{cm}^2$

Cisalhamento no corpo $F_{vu} = 3225 \text{ kgf} / \text{cm}^2$

- Parafuso de alta resistência galvanizado, de aço de baixo ou médio carbono, com tratamento térmico — ASTM A 394 Tipo 1 ou 2:

Tração $F_u = 8436 \text{ kgf / cm}^2$

Cisalhamento na rosca ou no corpo $F_{vu} = 5230 \text{ kgf / cm}^2$

5.4.2 Distâncias Mínimas e Usuais — A norma da ASCE recomenda para distâncias mínimas, entre furos e entre furos e bordas, os valores mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2 e que foram determinados através das expressões a seguir e das práticas usuais de fabricação. Deve ser observado que com a adoção dos valores tabelados evitamos o rasgamento das chapas de ligações.

- A distância mínima (A) do centro do furo à borda de extremidade, perpendicular ou inclinada à direção da força, é dada pelo maior dos três valores:

$$A_{\min} \geq \frac{1,2 P}{F_u \cdot t}$$

$$A_{\min} \geq 1,3 d_p$$

$$A_{\min} \geq t + d_p / 2$$

onde:

P = Força transmitida por um parafuso.

F_u = Menor limite de resistência das partes conectadas.

t = Espessura da chapa mais fina.

d_p = Diâmetro nominal do parafuso.

- A distância mínima (B) entre centros dos furos é dada pelo maior dos dois valores:

$$B_{\min} \geq \frac{1,2 P}{F_u \cdot t} + 0,6 d_p$$

$$B_{\min} \geq \text{diâmetro da porca} + 10 \text{ mm}$$

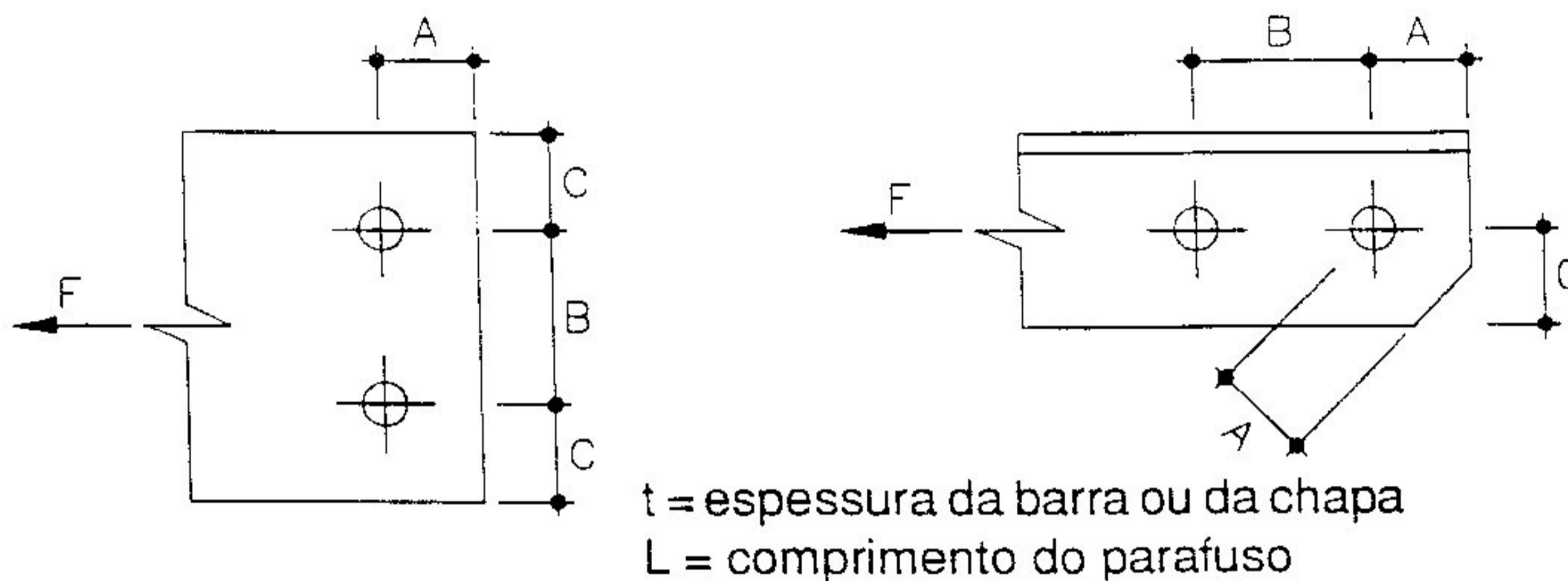
- A distância mínima (C) entre o centro do furo e uma borda paralela à direção da força é dada pelo maior dos dois valores:

$$C_{\min} \geq 0,85 A_{\min} \rightarrow \text{para borda laminada}$$

$$C_{\min} \geq 0,85 A_{\min} + 1,6 \text{ mm} \rightarrow \text{para borda cortada}$$

Tabela 5.1											
Distâncias Mínimas entre Furos e de Furos às Bordas (Série Métrica)											
<p>t = espessura da barra ou da chapa L = comprimento do parafuso</p>											
Parafuso [mm]	t [mm]	A		B		C [mm]					
		Usual [mm]	Mín. [mm]	Usual [mm]	Mín. [mm]	Usual	Mín. para L				
							≤ 50	> 50			
M 12	≤ 10	20	19	40	32	20	16	18			
	11		20							17	19
	12		25				21			18	20
M 14	≤ 11	25	21	50	35	25	18	20			
	12		22				19	21			
	13		23				19	21			
	14		24				20	22			
M 16	≤ 13	25	24	50	39	25	20	22			
	14		25				21	23			
	16		30				23	25			
M 20	≤ 16	30	29	60	45	30	25	27			
	18	35	31				26	28			
	20		33				28	30			
M 24	≤ 18	35	34	70	52	35	29	31			
	20		35				30	32			
	22	40	37				31	33			
	24		39				33	35			

Tabela 5.2
Distâncias Mínimas entre Furos e de Furos às Bordas
(Série em Polegadas)



Parafuso (pol)	t [mm]	A		B		C [mm]		
		Usual [mm]	Mín. [mm]	Usual [mm]	Mín. [mm]	Usual	Mín. para L	
							≤ 50	> 50
1/2"	≤ 10,0	20	19	40	33	20	16	18
	11,1		20				17	19
	12,0	25	21				18	20
	12,7		22			25	19	21
5/8"	≤ 13,0	25	24	50	38	25	20	22
	14,0		25				21	23
	15,9	30	27				23	25
3/4"	≤ 14,0	30	28	60	44	30	23	25
	15,9		28				24	26
	18,0		30				26	28
	19,1	35	31				27	29
7/8"	≤ 18,0	35	32	70	49	35	27	29
	19,1		33				28	30
	20,0		34				29	31
	22,2	40	36				31	33
1"	≤ 20,0	40	36	80	55	40	31	33
	22,2		38				32	34
	24,0		40				34	36
	25,4	45	41				35	37

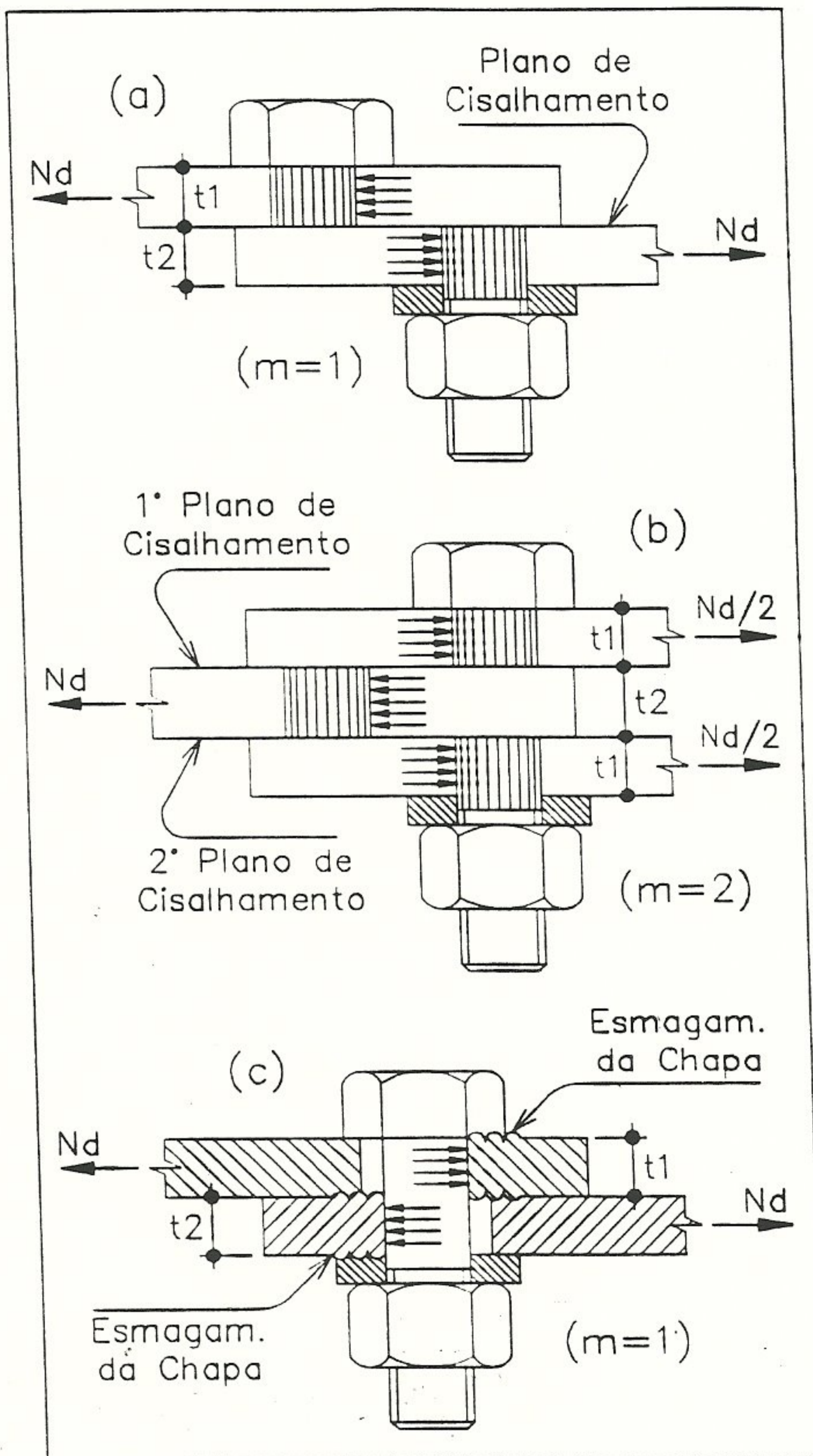


Figura 5.6
Cisalhamento e Esmagamento
nas Ligações

5.4.3 Estados Limites

Últimos — Os estados limites últimos a serem verificados em uma ligação por contato (*Bearing Type*) são o cisalhamento nos parafusos, Figura 5.6(a) e 5.6(b), e o esmagamento da chapa da ligação, Figura 5.6(c). A verificação do cisalhamento dos parafusos é feita com a seguinte expressão:

Cisalhamento dos Parafusos 5.9

$$f_v = \frac{N_d}{m \cdot n_p \cdot A_p} \leq F_v$$

onde:

f_v = Tensão de cálculo de cisalhamento no parafuso.

N_d = Esforço normal de cálculo atuante na barra ou chapa de ligação.

m = Número de planos de cisalhamento.

n_p = Número de parafusos da ligação.

A_p = Área bruta do corpo do parafuso, calculada pela expressão:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (\text{sendo: } d_p = \text{Diâmetro nominal do parafuso})$$

F_v = Limite de resistência ao cisalhamento no corpo dos parafusos minorado por um coeficiente de segurança, com os valores:

$$0,66 F_{vu} = 2130 \text{ kgf/cm}^2 \text{ para parafuso tipo 0.}$$

$$0,87 F_{vu} = 4550 \text{ kgf/cm}^2 \text{ para parafuso tipo 1 e 2.}$$

A verificação ao esmagamento das chapas é feita com a seguinte expressão:

Esmagamento das Chapas

5.10

$$f_p = \frac{N_d}{n_p \cdot d_p \cdot t} \leq F_p$$

onde:

f_p = Tensão de compressão de cálculo entre o parafuso e a chapa de ligação.

N_d = Esforço normal de cálculo atuante em uma chapa.

n_p = Número de parafusos da ligação.

d_p = Diâmetro nominal do parafuso.

t = A menor das espessuras dos elementos da ligação.

$F_p = 1,0833 F_u$ = Limite de resistência ao esmagamento da chapa.

6

Dimensionamento das Fundações

Os tipos de fundações normalmente utilizados para torres de linhas de transmissão estão mostrados na Figura 6.1. Entre eles, os três primeiros — grelha metálica, sapata com *stub* e tubulão com *stub* — são os mais empregados e nos ocuparemos deles. Quanto aos dois tipos restantes, a fundação com estacas e bloco com chumbadores e placa de base é adotada apenas nos locais em que a baixa qualidade do terreno a exigir e a fundação com placa de base e chumbadores ancorados diretamente na rocha é adotada, evidentemente, quando for possível chegar-se à rocha com o mínimo de escavação [4], [32].

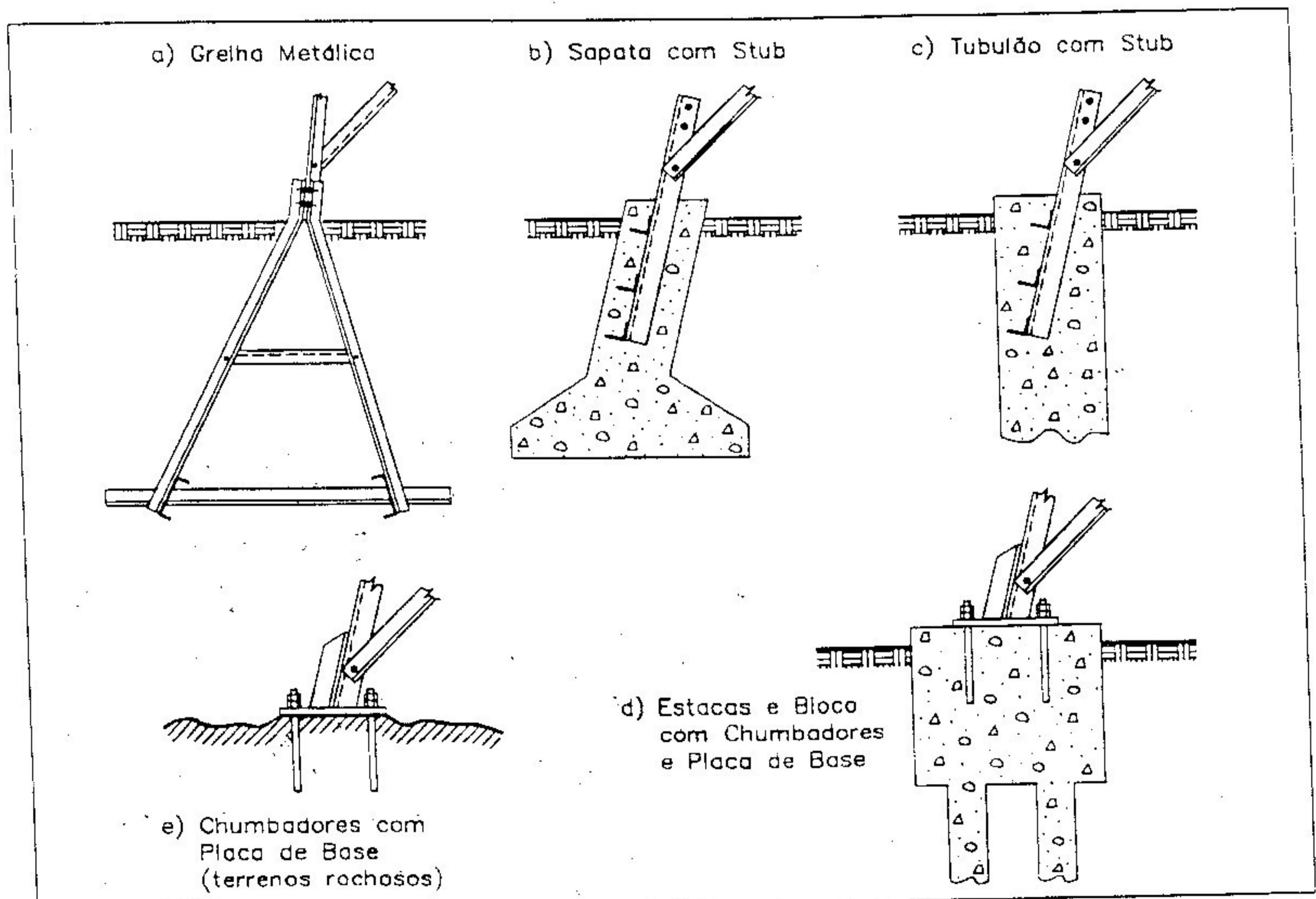


Figura 6.1
Tipos de Fundações

6.1 Dimensionamento da Fundação em Grelha Metálica

A grelha metálica, Figura 6.2, é uma estrutura com base plana constituída por dois perfis do tipo (U) – barras O3 – que, através de furos em suas almas, recebem várias cantoneiras – barras O4 – para formar a grelha propriamente dita. Os montantes em cantoneiras – barras O1 – são os elementos que fazem a ligação da grelha com a superestrutura da torre. As barras redundantes – O2 – servem para reduzir do comprimento de flambagem dos montantes. A grande vantagem deste tipo de fundação é a rapidez de execução e a possibilidade de sua fabricação em escala industrial.

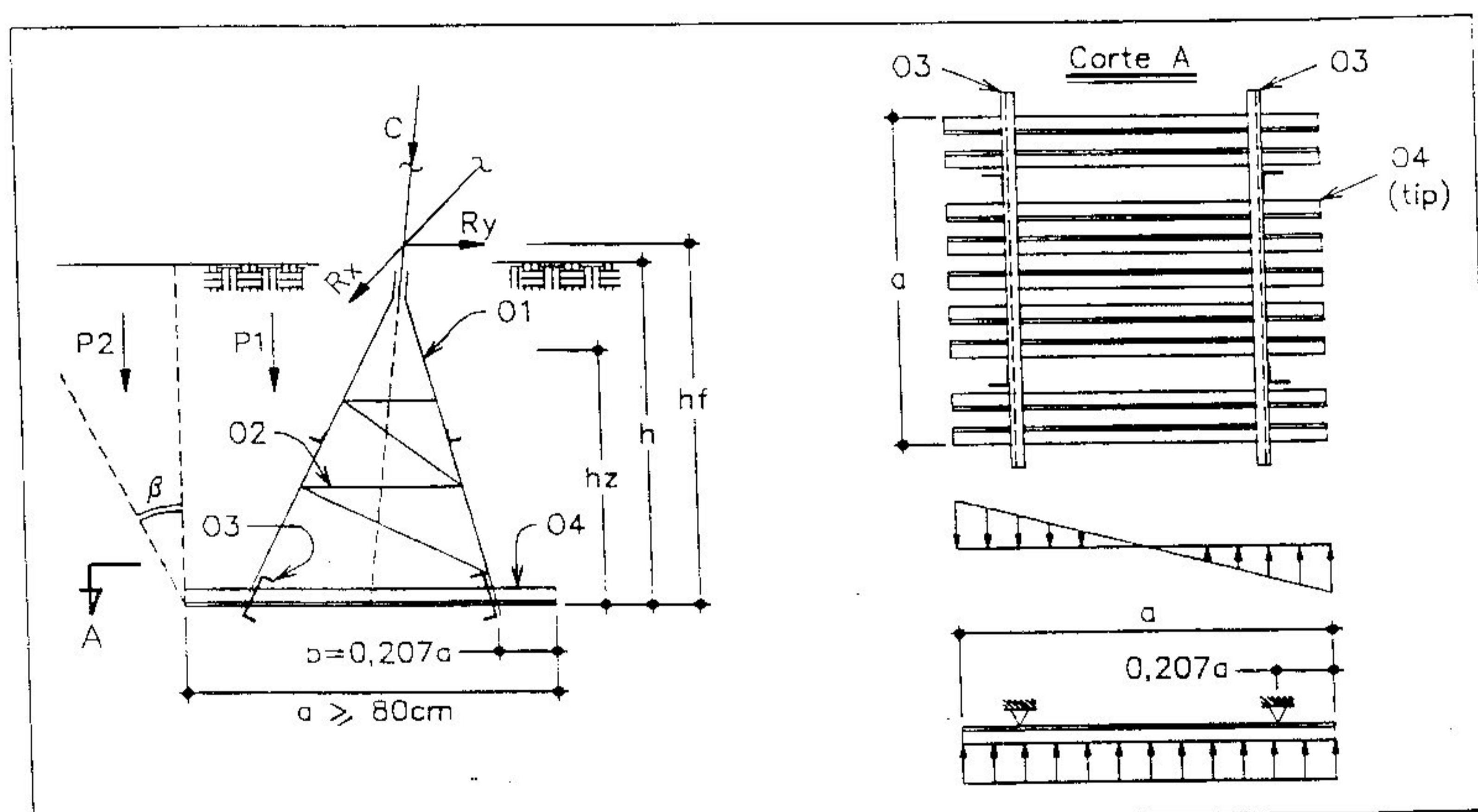


Figura 6.2
Grelha Metálica

6.1.1 Verificação do Arrancamento da Fundação — O maior esforço de tração de cálculo (arrancamento) deverá ser resistido pelo peso de um volume de terra limitado por um sólido semelhante a um tronco de pirâmide invertido, conforme mostrado na Figura 6.3. Este peso de terra (P_t), que atuará no sentido contrário ao do arrancamento, deverá satisfazer a seguinte condição:

$$P_t = \gamma V_t \geq CS \cdot T_{\max}$$

onde:

T_{\max} = Maior esforço de tração de cálculo atuando na direção do montante da torre.

CS = Coeficiente de segurança adicional.

γ = Peso específico do solo.

V_t = Volume do sólido, dado pela expressão abaixo:

$$V_t = a^2 h + 2 a h^2 \operatorname{tg}(\beta) + (\pi/3) h^3 \operatorname{tg}^2(\beta) \quad \text{— onde:}$$

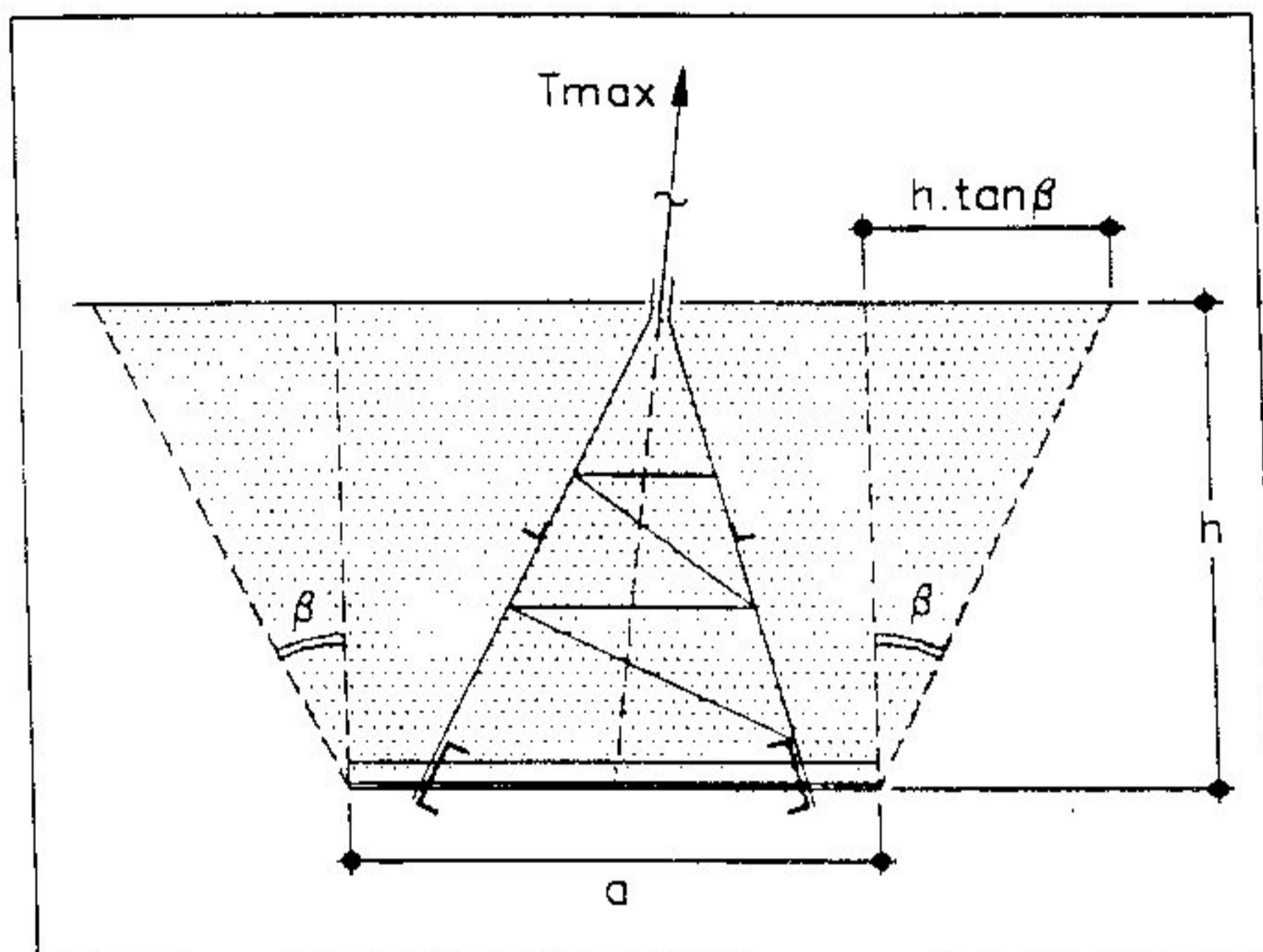


Figura 6.3
Arrancamento da Fundação

a = Largura da fundação.

h = Profundidade da fundação.

β = Ângulo de atrito do terreno.

6.1.2 Verificação da Compressão no

Terreno — Na verificação da resistência do terreno à compressão determina-se inicialmente, pela expressão (6.2), o valor do momento atuante na base da fundação devido às cargas horizontais:

Momento Atuante

6.2

$$M = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \cdot h_f$$

onde:

R_x = Ação de cálculo atuante na fundação na direção do eixo (x).

R_y = Ação de cálculo atuante na fundação na direção do eixo (y).

h_f = Distância entre o ponto de encontro do montante da torre com a diagonal da perna e a base da fundação.

A seguir — sendo (h_z) a altura de terreno necessária para equilibrar o momento atuante — determinam-se pelas expressões (6.3) os momentos estabilizantes devido ao peso da terra:

Momentos Estabilizantes

6.3

$$P_1 = \gamma \cdot h_z \cdot a^2 / 2 \quad \therefore \quad M_1 = P_1 \cdot a / 4$$

$$P_2 = 0,5 \gamma a h_z [h_z \cdot \operatorname{tg}(\beta)] \quad \therefore \quad M_2 = P_2 [0,5 a + h_z \cdot \operatorname{tg}(\beta) / 3]$$

A altura (h_z), que aparece nas equações dos momentos estabilizantes, tem como limite superior a profundidade (h) da fundação. Nos casos em que não for possível com esta altura máxima combater o momento atuante através do estabilizante, teremos um momento resultante aplicado na base da fundação, no sentido do atuante, dado pela expressão (6.4):

Momento Resultante na Base da Fundação

6.4

$$M_R = M - M_1 - M_2$$

Verificamos agora a tensão de compressão na área bruta da fundação nas duas situações indicadas pelas expressões (6.5) e (6.6).

Tensão no Solo Uniformemente Distribuída

6.5

$$f_{bu} = \frac{C_{\max}}{a^2} \leq F_{bu}$$

onde:

C_{\max} = Maior esforço de compressão de cálculo nas fundações na direção do montante da torre.

a = Largura da fundação.

F_{bu} = Limite de resistência do solo à compressão na área bruta.

Tensão no Solo na Borda da Fundação

6.6

$$f_{bb} = \frac{C + P_1 + P_2}{a^2} + \frac{6 M_R}{a^3} \leq F_{bb}$$

onde:

C = Esforço de compressão de cálculo na fundação para a hipótese em estudo.

P_1, P_2 e M_R = Valores calculados anteriormente.

a = Largura da fundação.

F_{bb} = Limite majorado de resistência do solo à compressão na área bruta.

Finalmente, verificamos a tensão de compressão na área líquida da fundação nas duas situações indicadas pelas expressões (6.7) e (6.8).

Tensão no Solo Uniformemente Distribuída

6.7

$$f_{lu} = \frac{C_{\max}}{A_1} \leq F_{lu}$$

onde:

A_1 = Área líquida da grelha, dada pela expressão logo adiante.

F_{lu} = Limite de resistência do solo à compressão na área líquida.

$$A_1 = n a b_L + 2 a b_U - 2 n b_L b_U$$

sendo, nesta última expressão:

n = Número de cantoneiras da fundação.

b_L = Dimensão da aba da cantoneira (L).

b_U = Dimensão da aba do perfil (U).

a = Largura da fundação.

Tensão no Solo na Borda da Fundação

6.8

$$f_{lb} = \frac{C + P_1 + P_2}{A_1} + \frac{6 M_R}{n b_L a^2} \leq F_{lb}$$

onde:

F_{lb} = Limite majorado de resistência do solo à compressão na área líquida.

6.1.3 Verificação da Grelha Metálica e Montantes — O dimensionamento dos componentes da fundação em grelha metálica é feito da seguinte forma:

Perfis (U) — Barras O3 da Figura 6.2

6.9

$$M_{\max} = \left[\frac{C + P_1 + P_2}{a^2} + \frac{M_R}{a^3/6} \right] \cdot \frac{a (0,207 a)^2}{2} \therefore f_b = \frac{M_{\max}}{2 W_U} \leq F_y$$

onde:

M_{\max} = Momento máximo atuante na barra nos perfis (U).

f_b = Tensão de cálculo à flexão, a ser verificada.

W_U = Módulo de resistência do perfil (U) em relação ao eixo de maior inércia.

f_y = Limite de escoamento do aço.

Cantoneiras da Grelha — Barras O4 da Figura 6.2

6.10

$$M_{\max} = \frac{f_{lb} \cdot n \cdot b_L (0,207 a)^2}{2} \quad \therefore \quad f_b = \frac{M_{\max}}{n W_L} \leq F_y$$

onde:

M_{\max} = Momento máximo de cálculo atuante nas cantoneiras.

W_L = Módulo de resistência de uma cantoneira em relação ao eixo médio.

n = Número de cantoneiras da grelha.

f_b = Tensão de cálculo à flexão, a ser verificada.

Montantes — Barras O1 da Figura 6.2

6.11

$$F_m = \frac{C \sec(\gamma)}{4} + \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2} \cdot \sec(\gamma) h_f}{1,172 a} \quad \therefore \quad f_a = \frac{F_m}{A_g} < F_a$$

onde:

F_m = Força de compressão máxima de cálculo atuante nos montantes.

C = Esforço de compressão de cálculo na fundação que atua na direção do montante da torre.

γ = Maior ângulo entre aqueles que os montantes da fundação formam com o prolongamento do montante da torre.

R_x e R_y = Ações de cálculo atuantes na fundação nas direções dos eixos (x) e (y).

h_f = Distância entre o ponto de encontro do montante da torre com a diagonal e a base da fundação.

f_a = Tensão de cálculo à compressão, a ser verificada.

A_g = Área bruta da seção transversal do montante.

F_a = Tensão crítica de flambagem obtida das curvas da ASCE.

6.2 Dimensionamento de um *Stub*

O elemento estrutural de ligação da superestrutura da torre com o bloco de concreto da fundação é chamado *stub*. O dimensionamento é feito considerando a aderência entre o concreto da fundação e o aço do *stub*, bem como a compressão nas áreas de contato entre o concreto e as abas das cantoneiras (aletas) ligadas ao *stub*. A Figura 6.4 mostra esses elementos.

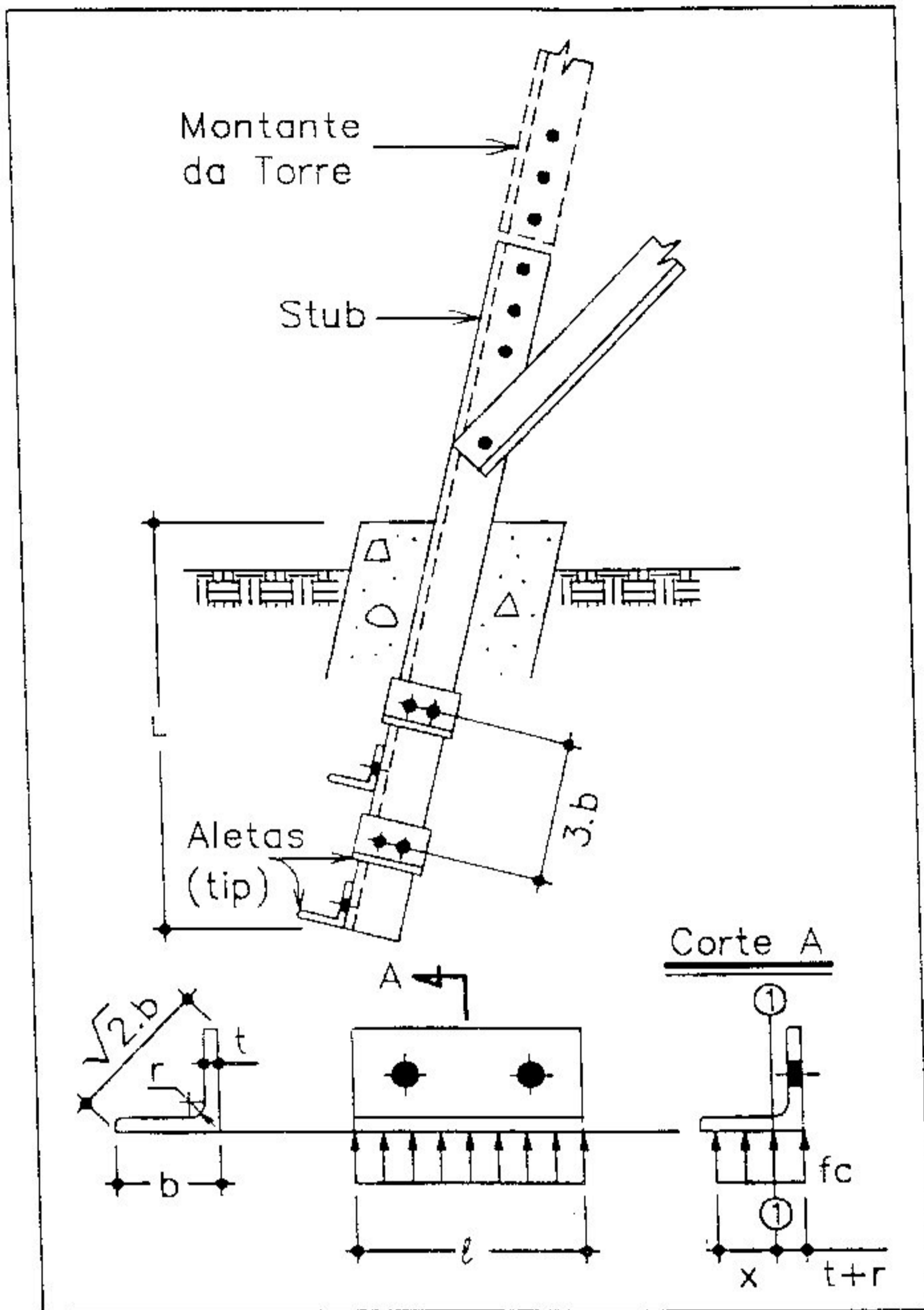


Figura 6.4
Detalhe de um Stub

6.2.1 Comprimento Mínimo do Stub

— No cálculo deste comprimento, devemos considerar que a força resultante devida às tensões de aderência entre o concreto da fundação e o aço do *stub* absorve 70% da carga máxima de compressão de cálculo.

O comprimento mínimo (*L*), vide Figura 6.4, do *stub* é determinado através da verificação indicada pela expressão (6.12).

$$L \geq \frac{0,7 C_{max}}{p \cdot \tau_{bu}} \tag{6.12}$$

onde:

p = Perímetro efetivo de cisalhamento do *stub* cujas expressões estão indicadas logo adiante.

τ_{bu} = Resistência de cálculo de aderência do concreto.

Denominando de (*b*) a largura da aba da cantoneira do *stub*, seu perímetro efetivo de cisalhamento será dado por:

Para uma cantoneira $p = (2 + \sqrt{2}) b$

Para duas ou quatro cantoneiras $p = 4 \sqrt{2} b$

6.2.2 Número de Aletas — Ainda com referência à Figura 6.4, o número de aletas (*n_a*) é determinado em função da flexão a que ficam submetidas para o que, inicialmente, calcula-se a área efetiva (*A_r*) da aleta resistente à compressão:

$$A_r = (t + r + x) l$$

onde:

t = Espessura da cantoneira.

r = Raio de laminação da cantoneira.

l = Comprimento da aleta.

x = Dimensão da aleta para o cálculo da área efetiva resistente.

O valor de (x) pode ser obtido calculando-se o momento fletor em relação à seção (1-1) da figura em referência:

$$M = f_{cd} \cdot \frac{x^2}{2} \cdot l$$

sendo (f_{cd}) a resistência de cálculo do concreto à compressão. Logo, a tensão de cálculo na aleta será:

$$f_b = \frac{M}{W} = f_{cd} \cdot \frac{x^2}{2} \cdot l \cdot \frac{6}{l t^2} = f_{cd} \cdot \frac{3 x^2}{t^2}$$

Como a tensão de cálculo tem que ser menor do que o limite de escoamento (F_y) do aço utilizado na aleta resulta, então, para o valor procurado de (x):

$$f_b = f_{cd} \cdot \frac{3 x^2}{t^2} \leq F_y \quad \therefore \quad x^2 \leq \frac{t^2 \cdot F_y}{3 f_{cd}} \quad \therefore \quad x = t \sqrt{\frac{F_y}{3 f_{cd}}}$$

Devemos observar ainda a existência do limite físico determinado pela largura da cantoneira da aleta, isto é:

$$x \leq b - t - r$$

Finalmente, como as aletas devem absorver 30% da carga máxima de compressão de cálculo, o número de aletas é dado por:

$$n_a = \frac{0,3 C_{\max}}{A_r \cdot f_{cd}}$$

6.2.3 Ligação das Aletas com o *Stub* — Sendo ($A_r \cdot f_{cd}$) o esforço máximo a ser resistido por cada aleta, a sua ligação com o *stub* pode ser dimensionada através da verificação das expressões (6.13) e (6.14).

Cisalhamento no Corpo
do Parafuso

6.13

$$f_v = \frac{A_r \cdot f_{cd}}{n_p A_p} \leq F_v$$

Pressão no Furo
da Cantoneira

6.14

$$f_p = \frac{A_r \cdot f_{cd}}{n_p d_p t} \leq F_p$$

nas quais:

A_p = Área bruta do corpo do parafuso.

n_p = Número de parafusos da ligação.

d_p = Diâmetro nominal do parafuso.

t = Espessura da cantoneira (aleta ou *stub*).

f_v = Tensão de cisalhamento de cálculo no corpo do parafuso.

F_v = Limite de resistência ao cisalhamento no corpo do parafuso, minorado por um coeficiente de segurança.

f_p = Tensão de compressão de cálculo entre o parafuso e a chapa de ligação.

F_p = Limite de resistência ao esmagamento da cantoneira.

7

Programas para Análise e Dimensionamento

7.1 Fluxo Geral do Sistema

A Figura 7.1 mostra o fluxograma geral do sistema, por nós desenvolvido, para o cálculo de torres de linhas de transmissão cujas rotinas, aqui descritas de maneira sucinta, serão detalhadas mais adiante neste capítulo.

Na etapa (01) o programa TPGEDA gera o arquivo de dados TORRE . DAT necessário ao cálculo e faz sua consistência para detectar possíveis erros de entrada. Aliás, não só nesta etapa mas também nas seguintes faremos sempre testes de consistência para detectar erros. Como opção para facilitar o trabalho, o arquivo TORRE . DAT poderá ser gerado a partir de outro existente com o emprego de um editor de textos.

Na etapa (02) o programa TPGEOM gera o arquivo TORRE . L01 para listagem da geometria da estrutura e o arquivo TORRE . WK1 com os dados da geometria necessários para o prosseguimento dos cálculos.

Na etapa (03) o programa TPGCAR gera o arquivo TORRE . L02 para a listagem do carregamento atuante na estrutura e o arquivo TORRE . WK2 com os dados do carregamento necessários para o prosseguimento dos cálculos.

Na etapa (04) o programa TPAETO monta a matriz de rigidez da estrutura, resolve o sistema de equações, isto é, calcula os deslocamentos nodais e a seguir calcula os esforços nas barras e as reações de apoio. O programa TPAETO também gera os arquivos TORRE . L03, TORRE . WK3 e TORRE . WK4. O arquivo TORRE . L03 permite a impressão de mensagens e resultados parciais. Os arquivos TORRE . WK3 e TORRE . WK4 contêm respectivamente os esforços nas barras e as reações de apoio, valores estes que serão utilizados posteriormente.

Nas etapas (05) e (06) os programas TPDIBP e TPLCBA utilizam os resultados armazenados no arquivo TORRE . WK3 para

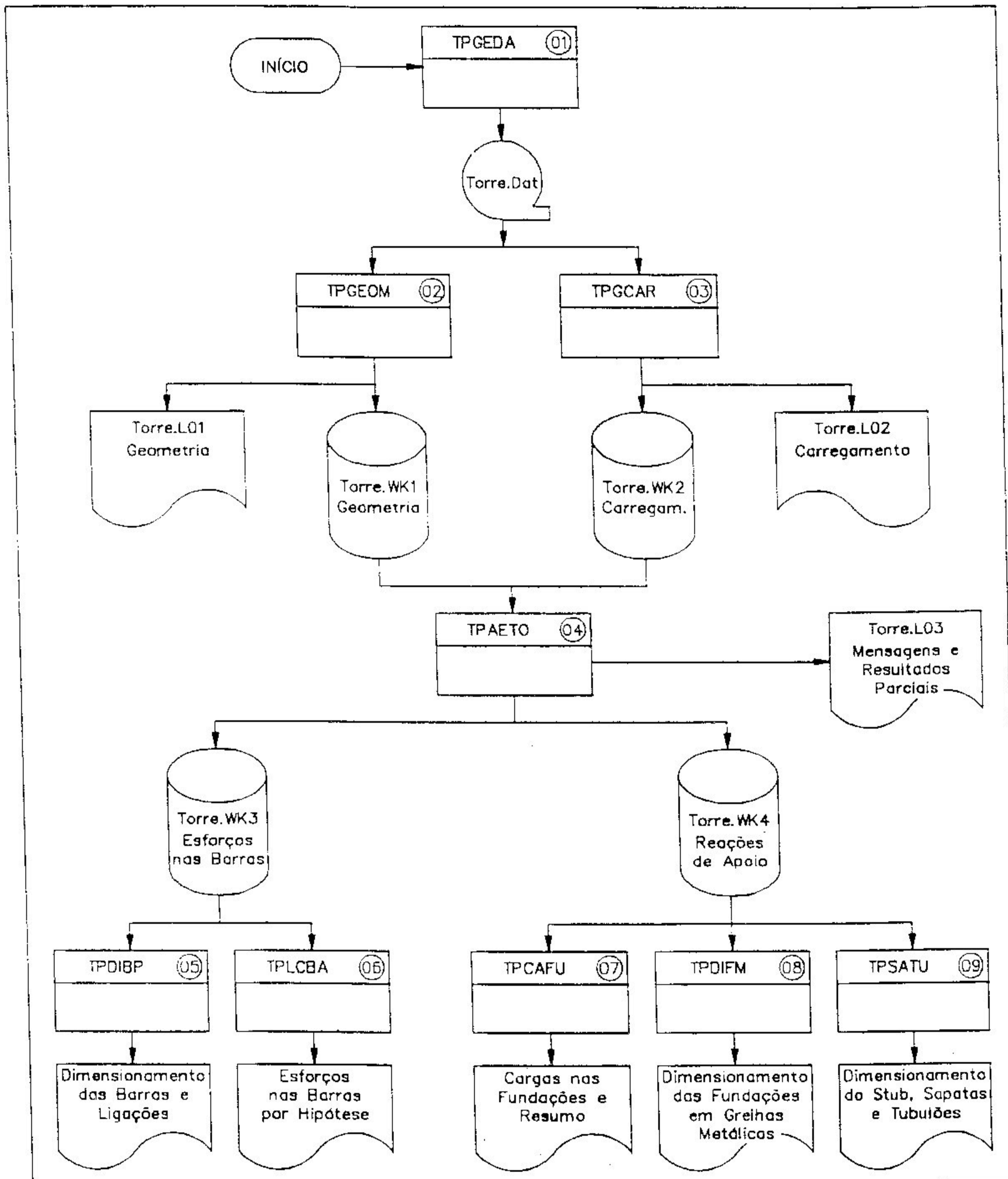


Figura 7.1
Fluxo Geral do
Sistema para Cálculo de Torres

dimensionar as barras e ligações e listar os esforços nas barras por hipótese de carregamento.

Finalmente, nas etapas (07), (08) e (09) os programas TPCAFU, TPDIFM e TPSATU utilizam os resultados armazenados no arquivo TORRE.WK4 para listar as cargas nas fundações e dimensionar as grelhas metálicas, stubs, sapatas e tubulões.

7.2 Geração da Geometria

Para facilitar o acompanhamento deste item, as Figuras 7.2 — 1ª Parte e 2ª Parte — mostram uma torre com a identificação de seus nós e barras. Adotamos para esta identificação a sistemática detalhada no Capítulo 3.

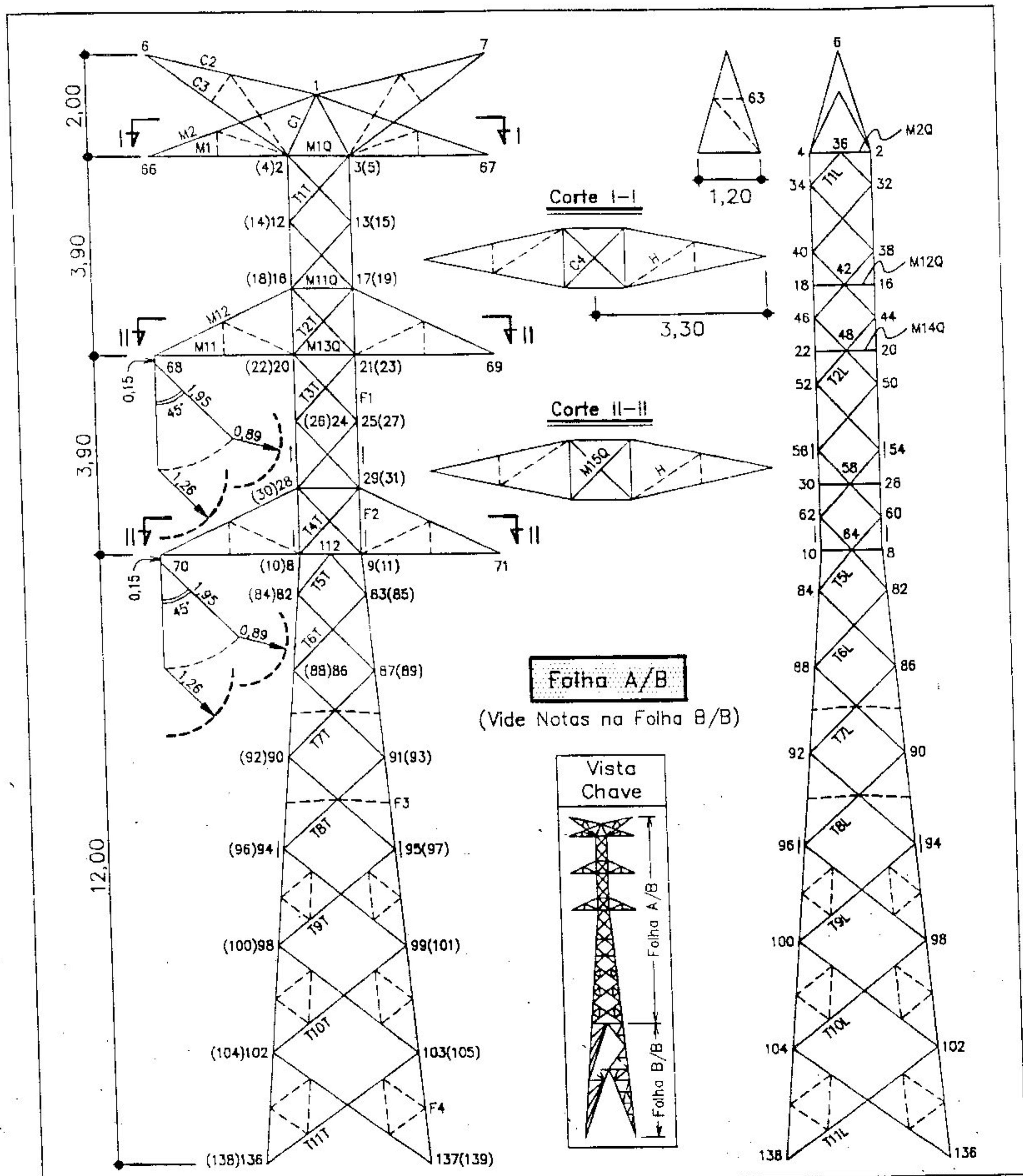


Figura 7.2 - 1ª Parte
Torre Tipo SSA - LT 138 kV

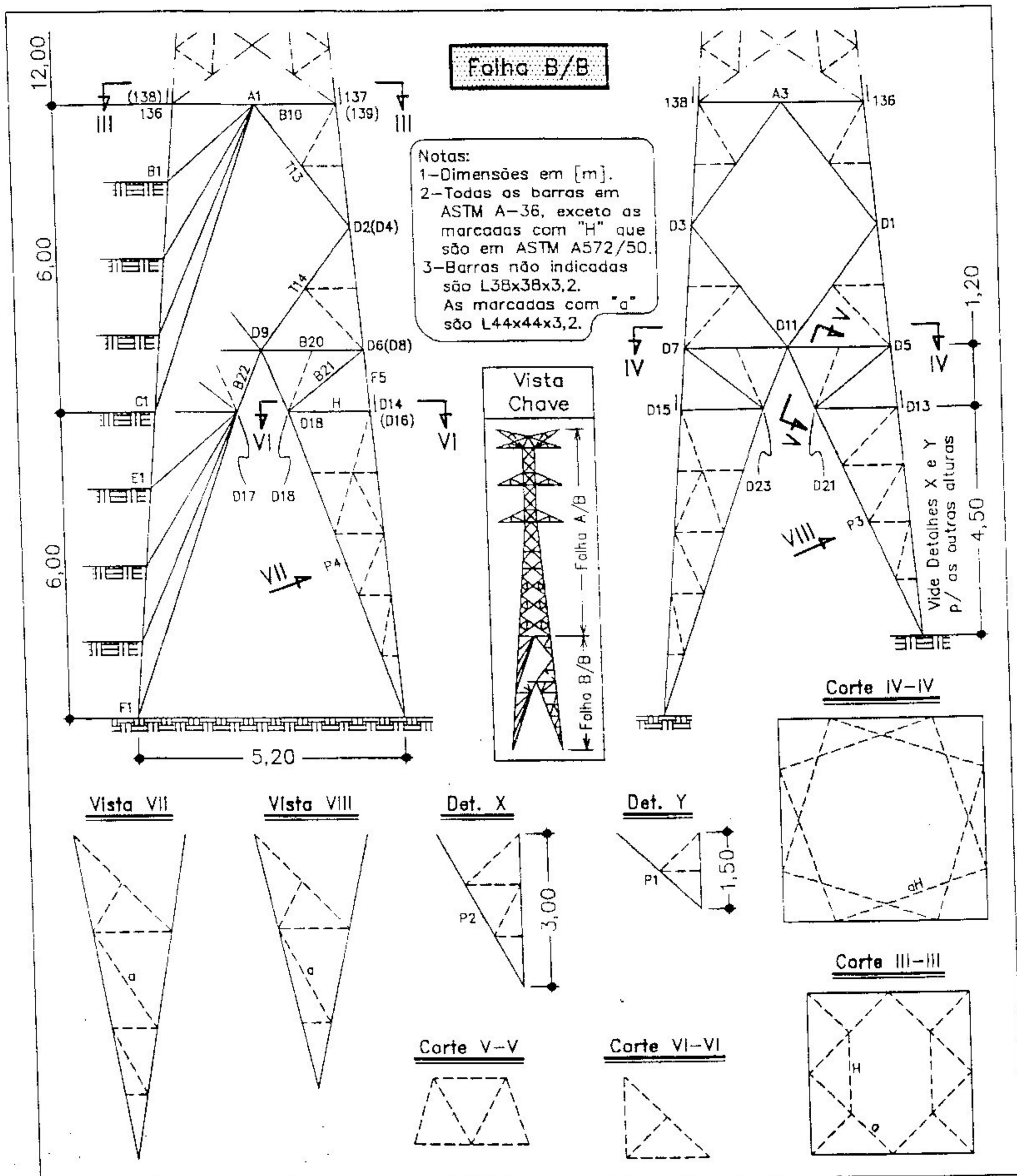


Figura 7.2 - 2ª Parte
 Torre Tipo SSA - LT 138 kV - 2ª Parte

7.2.1 Descrição dos Registros dos Dados de Entrada — As Figuras 7.3 e 7.4 mostram o *lay-out* dos seis tipos de registros a serem empregados na codificação dos dados da geometria de uma torre [28], detalhados a seguir. Destacamos que esta codificação é necessária quando o usuário utiliza um editor de textos para gerar o arquivo TORRE . DAT.

Caso este arquivo seja gerado pelo programa TPGEDA estes formulários servem para mostrar o *lay-out* do arquivo TORRE . DAT.

- REGISTRO 1 — Utilizamos o registro 1 para a identificação da família de torres a ser calculada. Os campos deste único registro são auto-explicativos.
- REGISTRO 2 — Neste conjunto de registros são codificadas as composições das estruturas da família considerada. Os campos de cada registro são:
 - Nome da Estrutura — Este campo é utilizado para identificar a torre conforme sua altura.
 - Caracteres Componentes — Este campo é utilizado para gerar a geometria de uma torre da família. Cada caracter identifica uma subestrutura da família e seus nós.
 - Composição Estrutural — Este campo é utilizado para selecionar as torres a serem calculadas resultantes de combinações entre a maior e a menor perna. Para sua codificação temos:

$$\left| \underline{A} \right| \left| \underline{B} \right| \left| \underline{C} \right|$$

onde:

A = Código de combinação de pernas, vide Tabela 7.1.

B = Caracter para identificar a subestrutura da menor extensão de perna.

C = Caracter para identificar a subestrutura da maior extensão de perna.

- REGISTRO 3 — Neste conjunto de registros são codificadas as coordenadas dos nós e as restrições nodais. Estas coordenadas podem ser geradas automaticamente e para isto são utilizadas técnicas que levam em conta a simetria e/ou a posição do nó em relação aos nós chaves da estrutura. A seguir detalhamos o significado dos diversos campos destes registros.
 - Nó — Este campo é utilizado para identificar o nó.
 - X, Y e Z — Estes campos são utilizados para fornecer as coordenadas do nó, ou valores que permitem obter estas coordenadas com auxílio dos campos N_x , N_y e N_z .
 - N_x , N_y e N_z — Estes campos são utilizados para indicar nós de referência, cujas coordenadas serão utilizadas para a determinação das coordenadas x, y e z do nó em foco. Esta determinação é feita somando-se as

- Índice de Simetria — Este campo é utilizado para indicar o código de simetria de um nó. Através deste código é possível a geração automática das coordenadas de nós simétricos. Adotamos a seguinte convenção:
 - 0 = Nó único.
 - 1 = Simetria em relação ao plano YZ. São geradas as coordenadas de dois nós, um localizado na frente da torre e outro atrás.
 - 2 = Simetria em relação ao plano XZ. São geradas as coordenadas de dois nós, um localizado à esquerda da torre e outro à direita.
 - 3 = Simetria em relação ao eixo da torre, para uma seção transversal triangular. São geradas as coordenadas de três nós localizados nos vértices de um triângulo equilátero.
 - 4 = Simetria dupla. São geradas as coordenadas de quatro nós situados nos vértices de um retângulo.

- Liberação — A ser implementado.

- NO1, NO2, NO3, NO4, NUM e DEN — Estes campos são utilizados para gerar as coordenadas de um nó segundo uma das quatro formas que detalhamos a seguir.
 - NO1, NO2 e uma Coordenada Qualquer — São dados os nós de referência NO1 e NO2 e uma coordenada qualquer do nó em foco. O programa irá calcular as duas coordenadas restantes considerando que o nó em foco é o ponto da reta que passa pelos nós NO1 e NO2 e que possui a coordenada dada. Na Figura 7.2 (1ª Parte) as coordenadas restantes do nó 20 poderão ser geradas com a utilização de sua coordenada Z e a sua condição de estar na reta determinada pelos nós de referência 2 e 8.
 - NO1, NO2, NUM e DEN — São dados os nós de referência NO1 e NO2 e uma fração de valor NUM / DEN. O programa irá calcular as coordenadas do nó em foco considerando que ele está situado na reta que passa pelos nós NO1 e NO2 a uma distância de NO1 igual ao valor $(\text{NUM} / \text{DEN}) \times L_{12}$ onde L_{12} é o comprimento do segmento de reta limitado pelos nós NO1 e NO2. Na Figura 7.2 (2ª Parte), a geração das coordenadas do nó D11 poderá ser feita observando que o mesmo está situado na reta que une os nós D5 e D7, a meia distância entre estes dois últimos a partir do nó D5.

- NO1, NO2, NO3 e uma Coordenada — São dados os nós de referência NO1, NO2 e NO3 e uma coordenada do nó em foco. O programa irá calcular as coordenadas restantes de um nó que tem a coordenada indicada e está situado numa reta paralela à que une NO1 e NO2 e que passa por NO3. Na Figura 7.2 (2ª Parte), são geradas as coordenadas do nó D17 se forem codificados, nos campos correspondentes, os nós 8, F1, A1 e a coordenada Z conhecida.
 - NO1, NO2, NO3 e NO4 — São dados os nós de referência NO1, NO2, NO3 e NO4. São geradas as coordenadas do nó situado na interseção das retas que passam por NO1–NO2 e NO3–NO4.
- REGISTRO 4 — Neste conjunto de registros são codificadas as características mecânicas dos materiais utilizados nas estruturas das torres. A seguir detalhamos o significado dos diversos campos deste registro.
- Tipo do Material — Este campo é utilizado para descrever o comportamento do material face à solicitação por tração ou compressão, conforme os seguintes códigos:
 - 1 = O material trabalhará quando solicitado à tração ou à compressão.
 - 2 = O material trabalhará somente quando solicitado à tração.
 - Número do Material — Este campo é utilizado para identificar o material das barras da estrutura.
 - Módulo de Elasticidade Longitudinal (E) — Este campo é utilizado para fornecer o módulo de elasticidade longitudinal do material.
 - Módulo de Elasticidade Transversal (G) — A ser implementado.
 - Coeficiente de Dilatação Térmica (α) — A ser implementado.
- REGISTRO 5 — Neste conjunto de registros são codificadas as propriedades geométricas das seções transversais das barras da estrutura. Os campos deste registro são auto explicativos, exceto pelo designado como Número do Perfil na Tabela que, caso seja empregado, deverá corresponder ao número da seção transversal do perfil considerado em uma tabela definida. Observamos, contudo, que dos diversos campos deste registro apenas os dois primeiros foram implementados.

- REGISTRO 6 — Este conjunto de registros é utilizado para gerar as barras da torre bem como para seu dimensionamento. A seguir detalhamos o significado dos diversos campos deste registro.
 - Nome da Barra — Este campo é utilizado para identificar uma barra ou conjunto de barras.
 - Nó Inicial — Este campo é utilizado para identificar o nó inicial da barra.
 - Nó Final — Este campo é utilizado para identificar o nó final da barra.
 - Índice de Simetria — Este campo é utilizado para codificar os índices de simetria, mostrados na Tabela 7.2, que poderão ser utilizados na geração de um conjunto de barras.
 - Número do Material — Este campo é utilizado para codificar o número do material.
 - Número da Seção Transversal — Este campo é utilizado para codificar o número da seção transversal.
 - Liberações e Ponto P — A serem implementados.
 - Os demais campos, cujo significado não detalhamos, são utilizados no dimensionamento das barras.


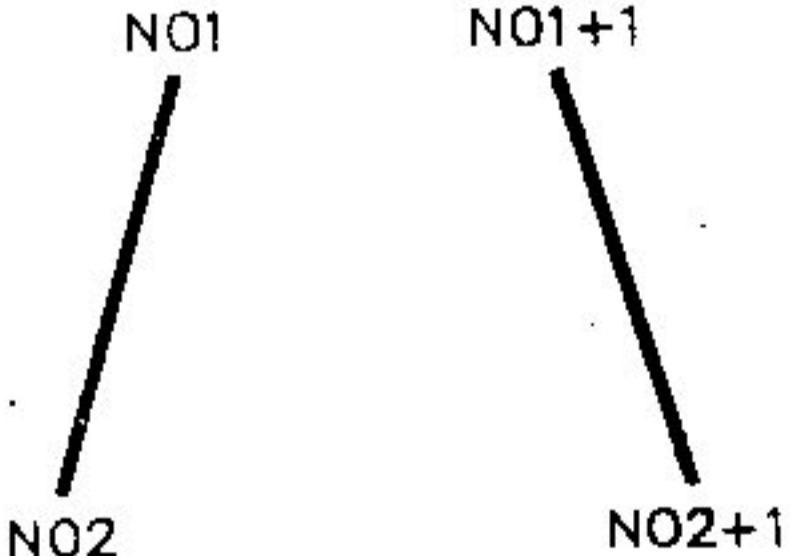
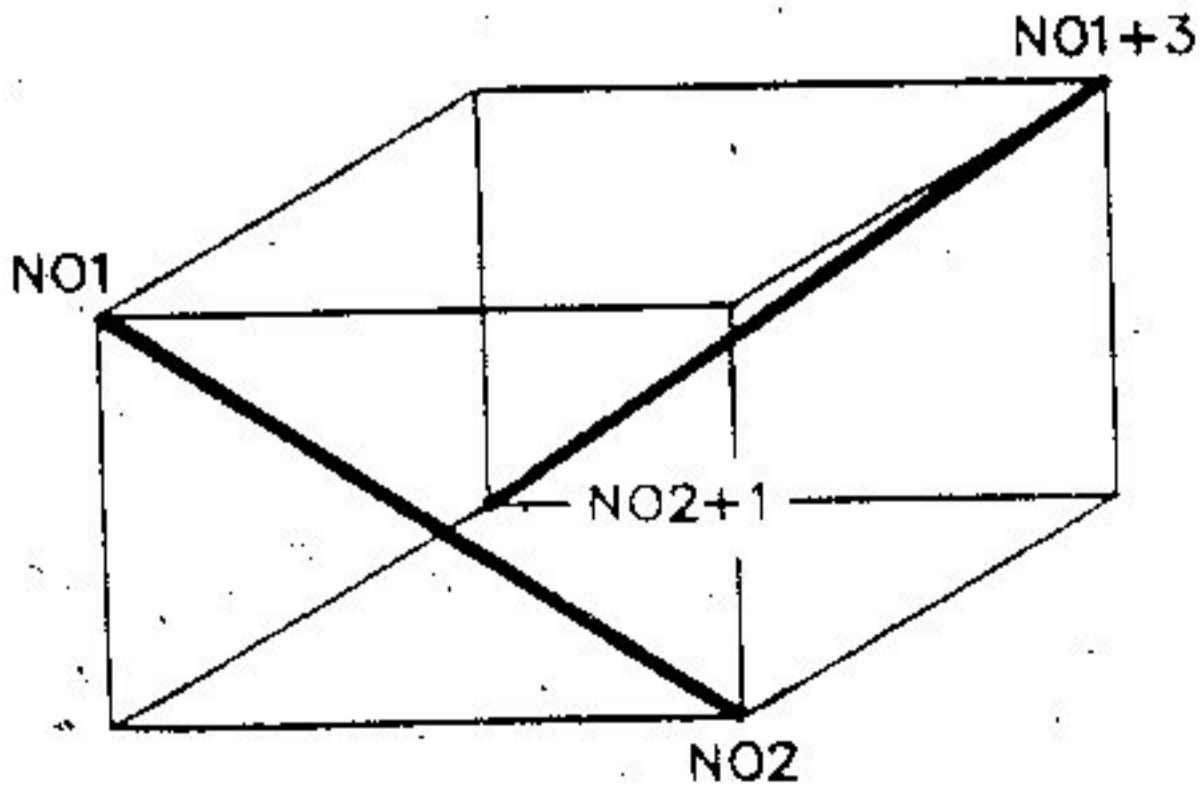
Tabela 7.2 Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	N ^o Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
1 ou 0	1	NO1 ao NO2	
2	2	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1	
3	2	NO1 ao NO2 NO1+3 ao NO2+1	

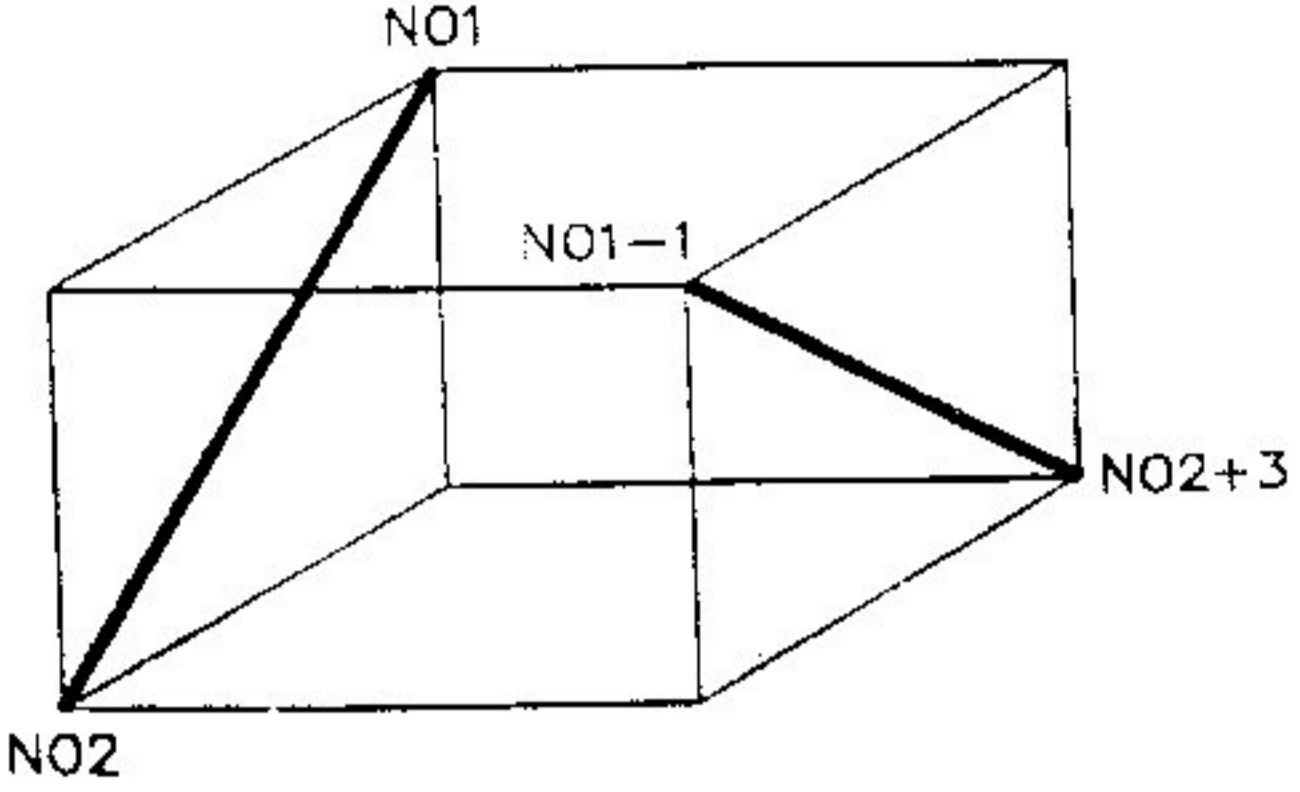
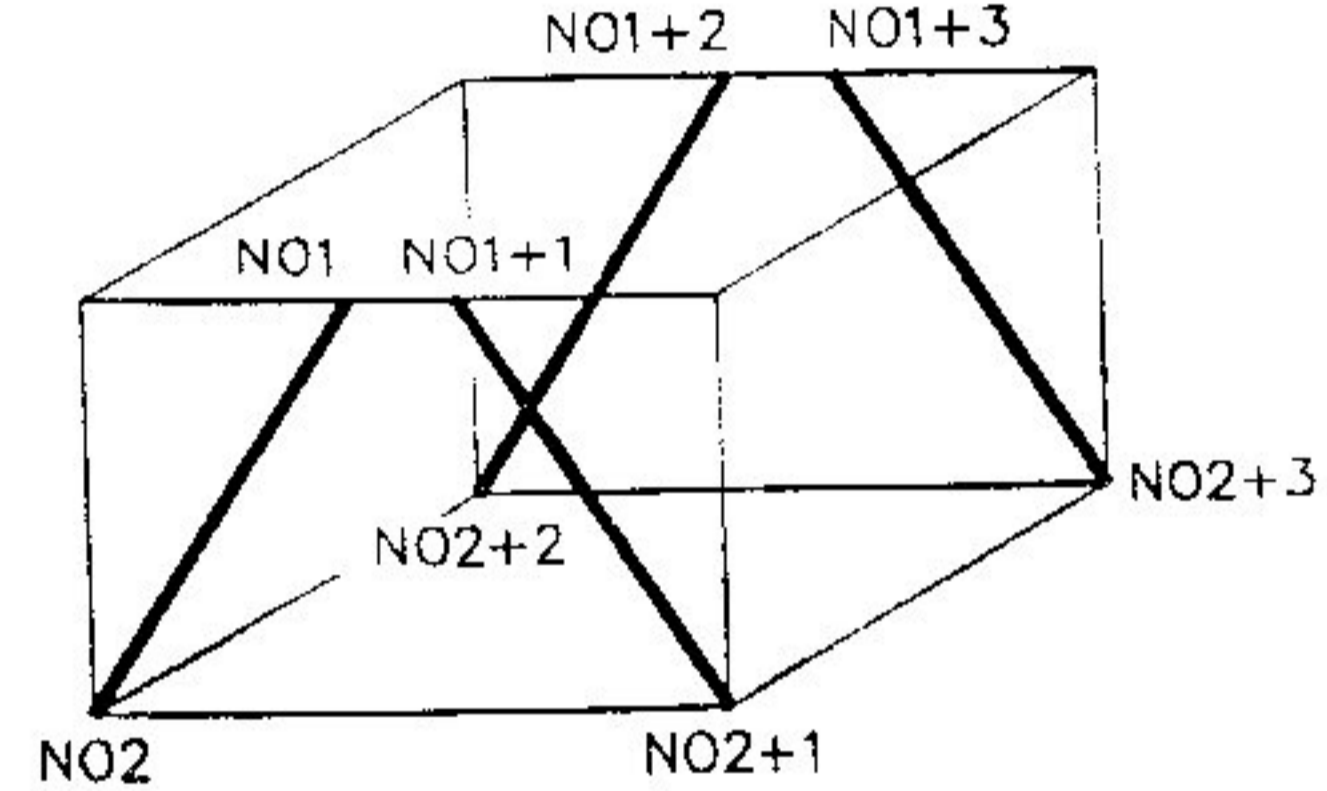
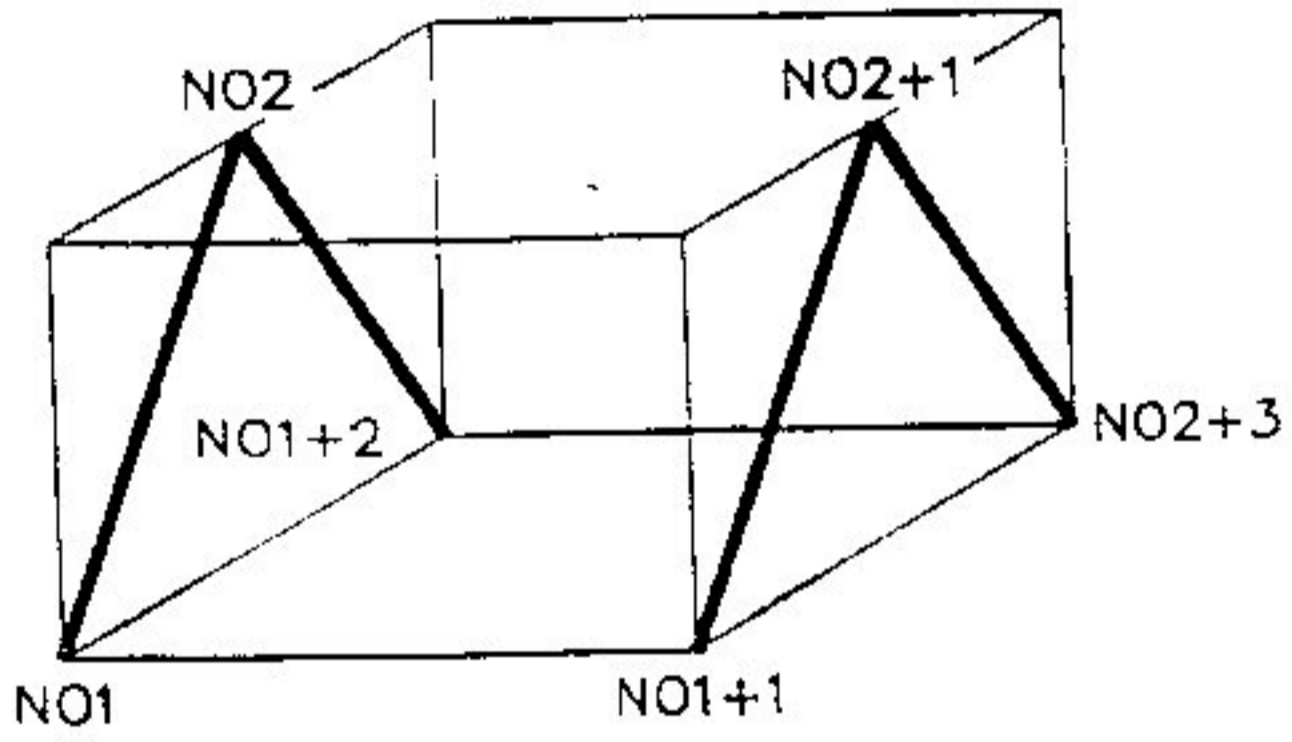
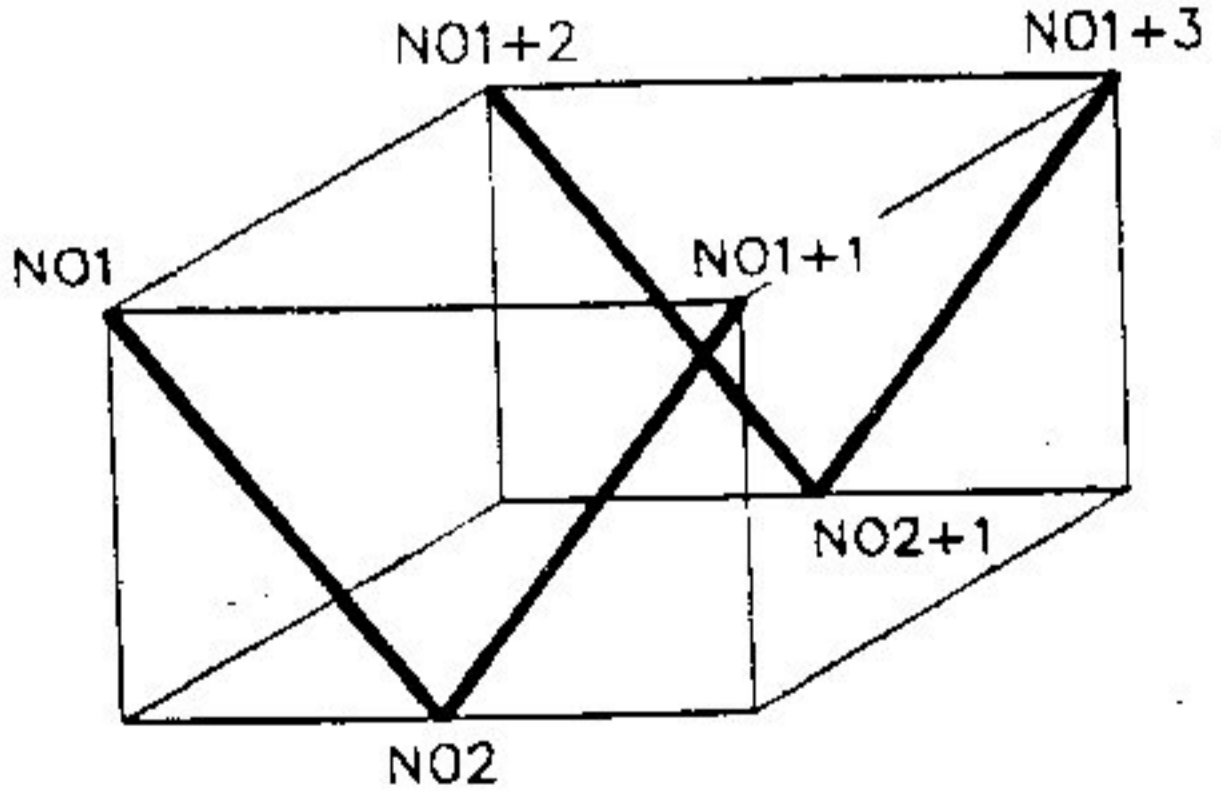
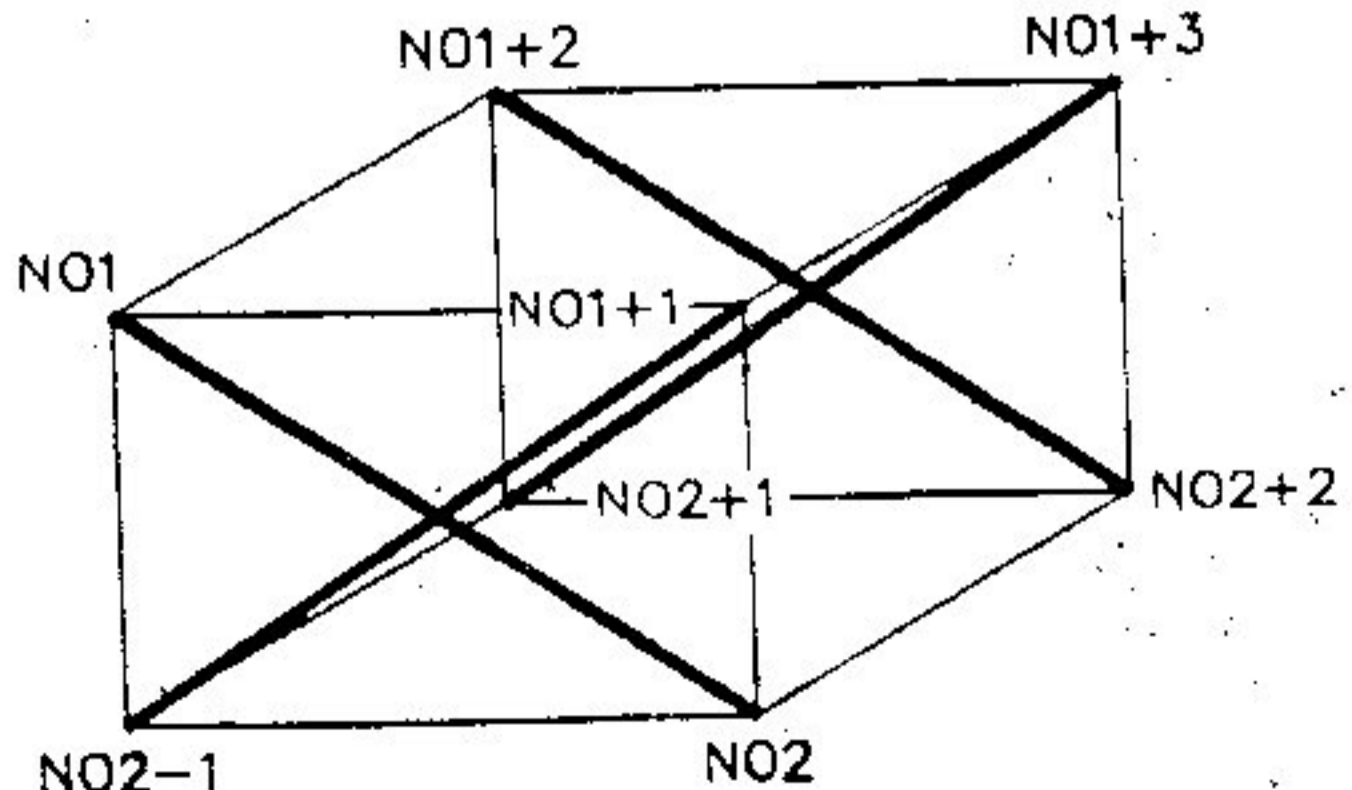
Tabela 7.2 (cont.)			
Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	N ^o Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
4	2	NO1 ao NO2 NO1-1 ao NO2+3	
5	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3	
6	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2 NO1+3 ao NO2+1	
7	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2 NO1+2 ao NO2+1 NO1+3 ao NO2+1	
8	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2-1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+1	

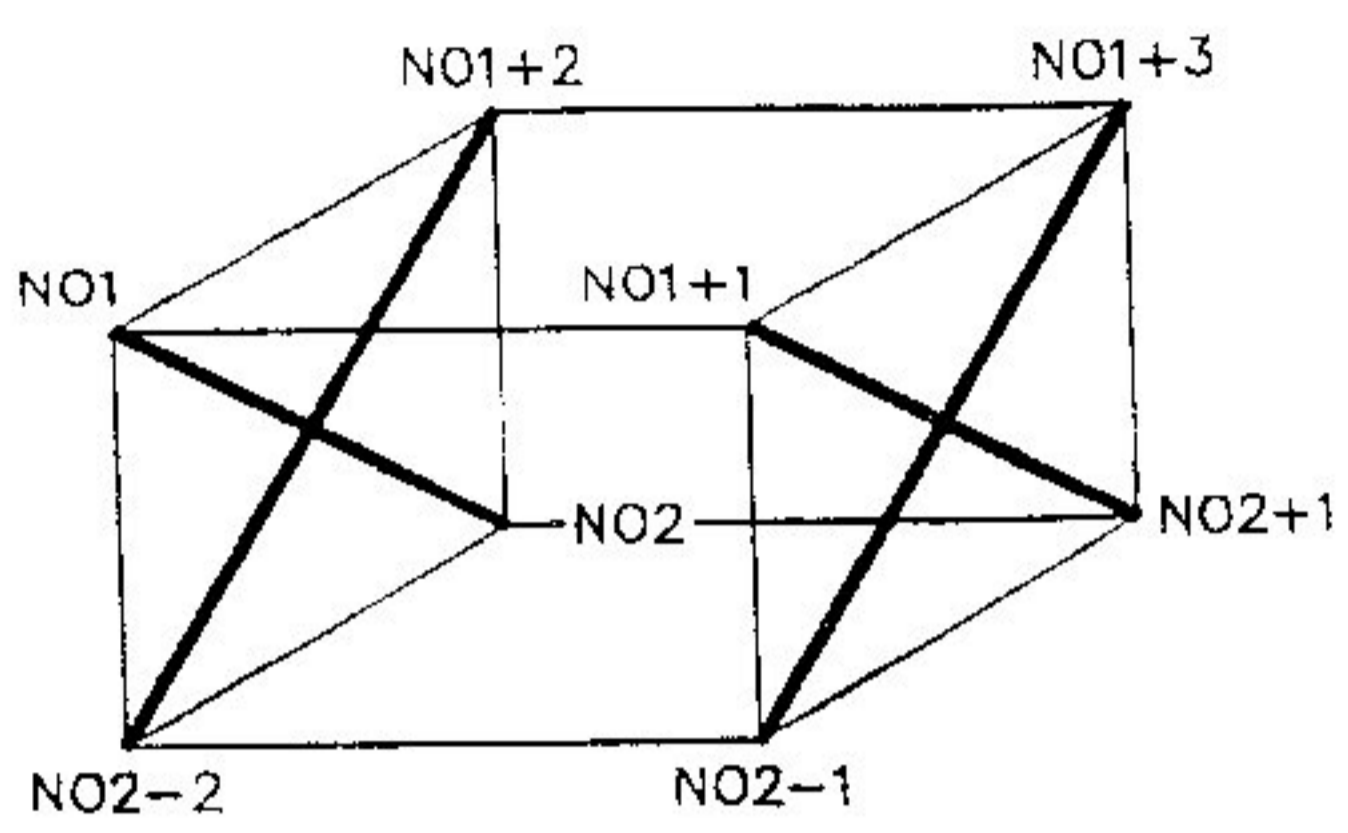
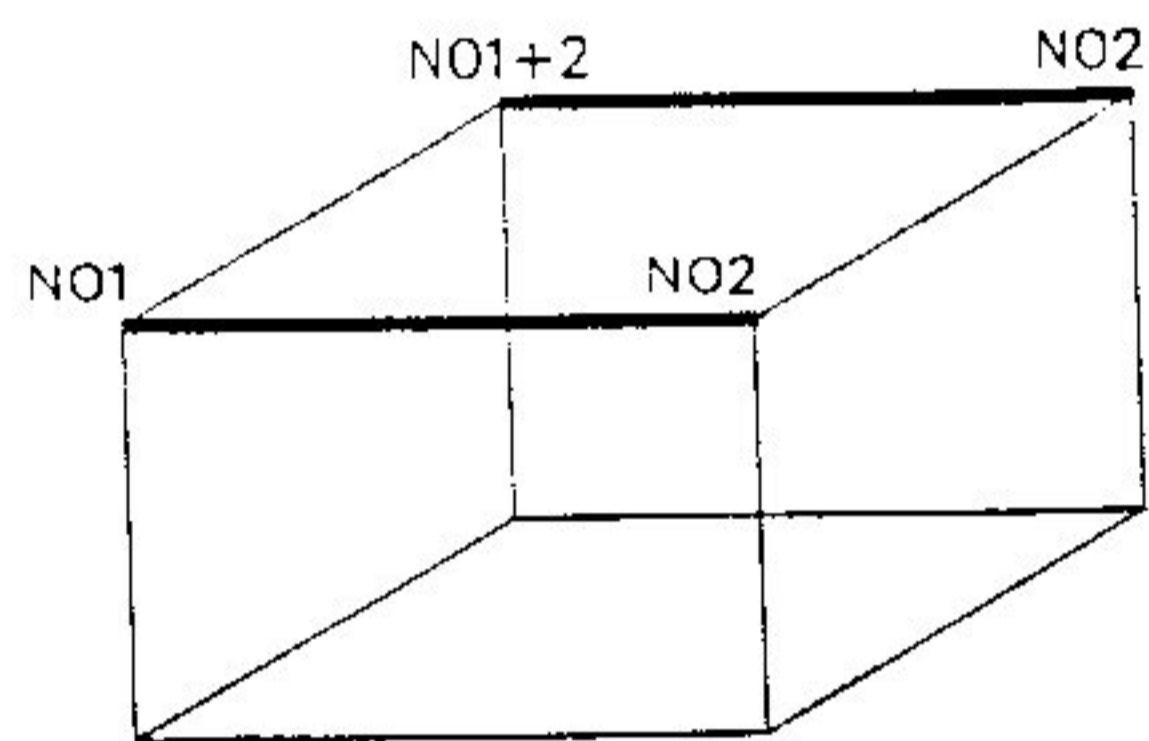
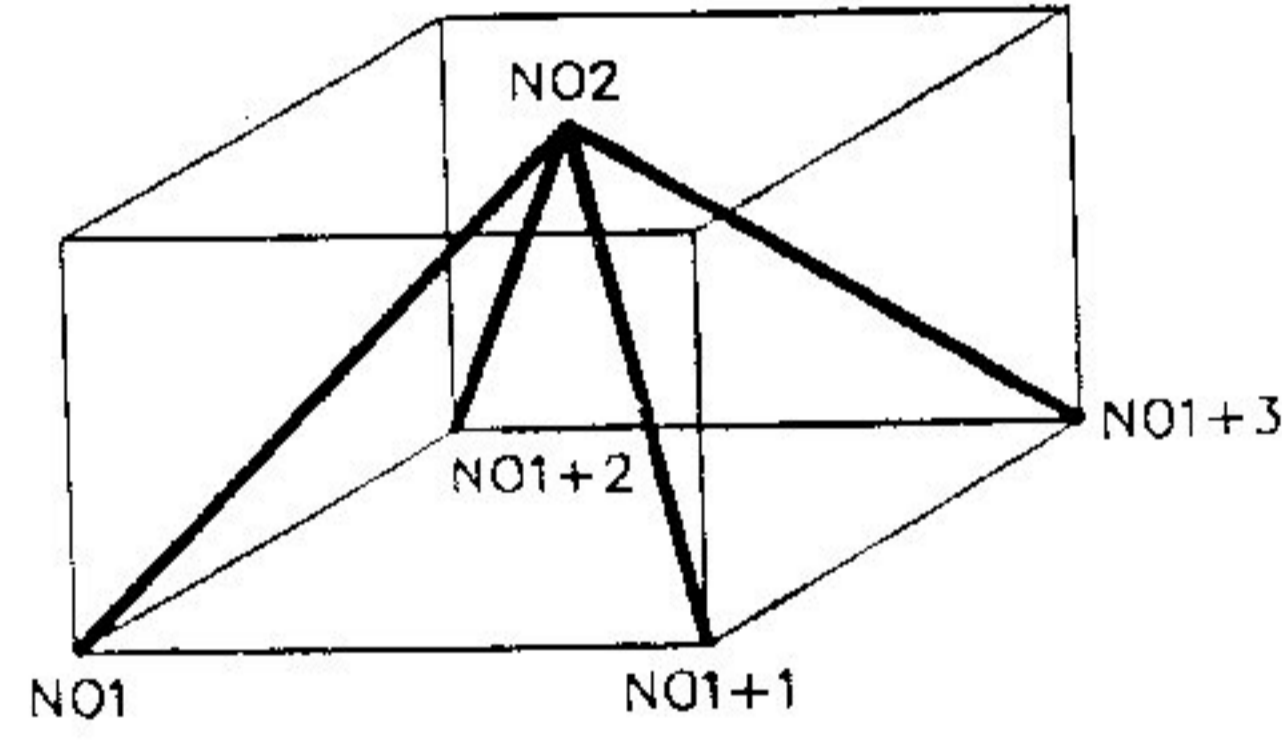
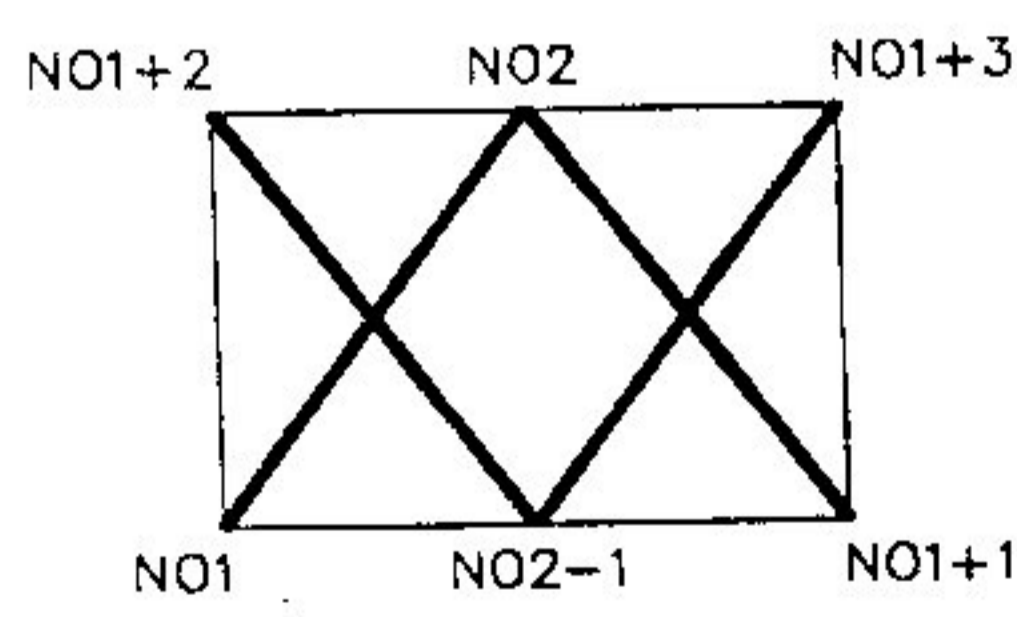
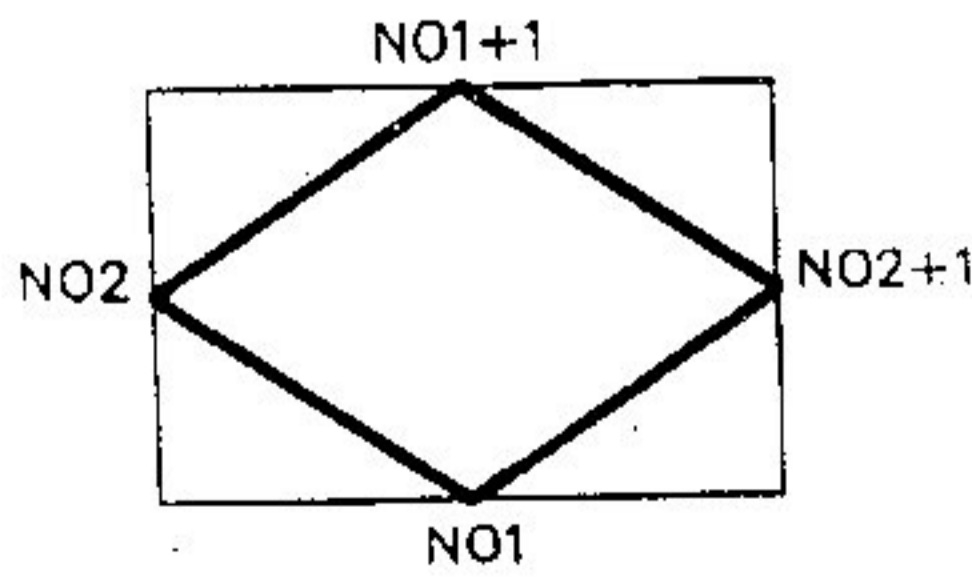
Tabela 7.2 (cont.) Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	Nº Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
9	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2-2 NO1+3 ao NO2-1	
10	2	NO1 ao NO2 NO1+2 ao NO2+2	
11	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2 NO1+2 ao NO2 NO1+3 ao NO2	
12	4	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2 NO1+2 ao NO2-1 NO1+3 ao NO2-1	
13	4	NO1 ao NO2 NO1 ao NO2+1 NO1+1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1	

Tabela 7.2 (cont.)			
Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	Nº Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
14	4	NO1 ao NO2 NO1+2 ao NO2+2 NO1 ao NO1+2 NO2 ao NO2+2	
15	2	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2-1	
16	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3 NO1+4 ao NO2 NO1+5 ao NO2+1 NO1+6 ao NO2+2 NO1+7 ao NO2+3	
17	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3 NO1+4 ao NO2+4 NO1+5 ao NO2+5 NO1+6 ao NO2+6 NO1+7 ao NO2+7	
18	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3 NO1 ao NO1+2 NO1+1 ao NO1+3 NO2 ao NO2+2 NO2+1 ao NO2+3	

Tabela 7.2 (cont.)			
Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	Nº Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
19	8	NO1 ao NO2 NO1+5 ao NO2-3 NO1+6 ao NO2-2 NO1+3 ao NO2+3 NO1+2 ao NO2-4 NO1+1 ao NO2-1 NO1+4 ao NO2+2 NO1+7 ao NO2+1	
20	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2 NO1+3 ao NO2+1 NO1+4 ao NO2 NO1+5 ao NO2+1 NO1+6 ao NO2 NO1+7 ao NO2+1	
21	2	NO1 ao NO2 NO1+3 ao NO2-1	
22	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3 NO3 ao NO4 NO3+1 ao NO4+1 NO3+2 ao NO4+2 NO3+3 ao NO4+3	
23	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2-1 NO1+3 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2-1 NO1+1 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2	

Tabela 7.2 (final) Índice de Simetria para a Geração das Barras			
Índice	N ^o Barras	Barras Geradas	Representação das Barras
24	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2 NO1+2 ao NO2+1 NO1+3 ao NO2+1 NO1 ao NO2+2 NO1+2 ao NO2+2 NO1+1 ao NO2+3 NO1+3 ao NO2+3	
25	8	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2+1 NO1+2 ao NO2+2 NO1+3 ao NO2+3 NO1+4 ao NO2+4 NO1+5 ao NO2+5 NO1+6 ao NO2+6 NO1+7 ao NO2+7	
26	4	NO1 ao NO2 NO1+2 ao NO2+2 NO3 ao NO4 NO3+2 ao NO4+2	
27	2	NO1 ao NO2 NO1+1 ao NO2	

7.2.2 Fluxograma da Rotina TPGEOM — A Figura 7.5 mostra o fluxograma da rotina TPGEOM utilizada na geração das geometrias de torres de uma mesma família e cujas etapas passamos a detalhar.

- (01) Nesta etapa são inicializadas as variáveis e constantes utilizadas na rotina TPGEOM.
- (02) Nesta etapa é lido o registro tipo TI (identificação da família) e os registros do tipo ES (composição das estruturas).

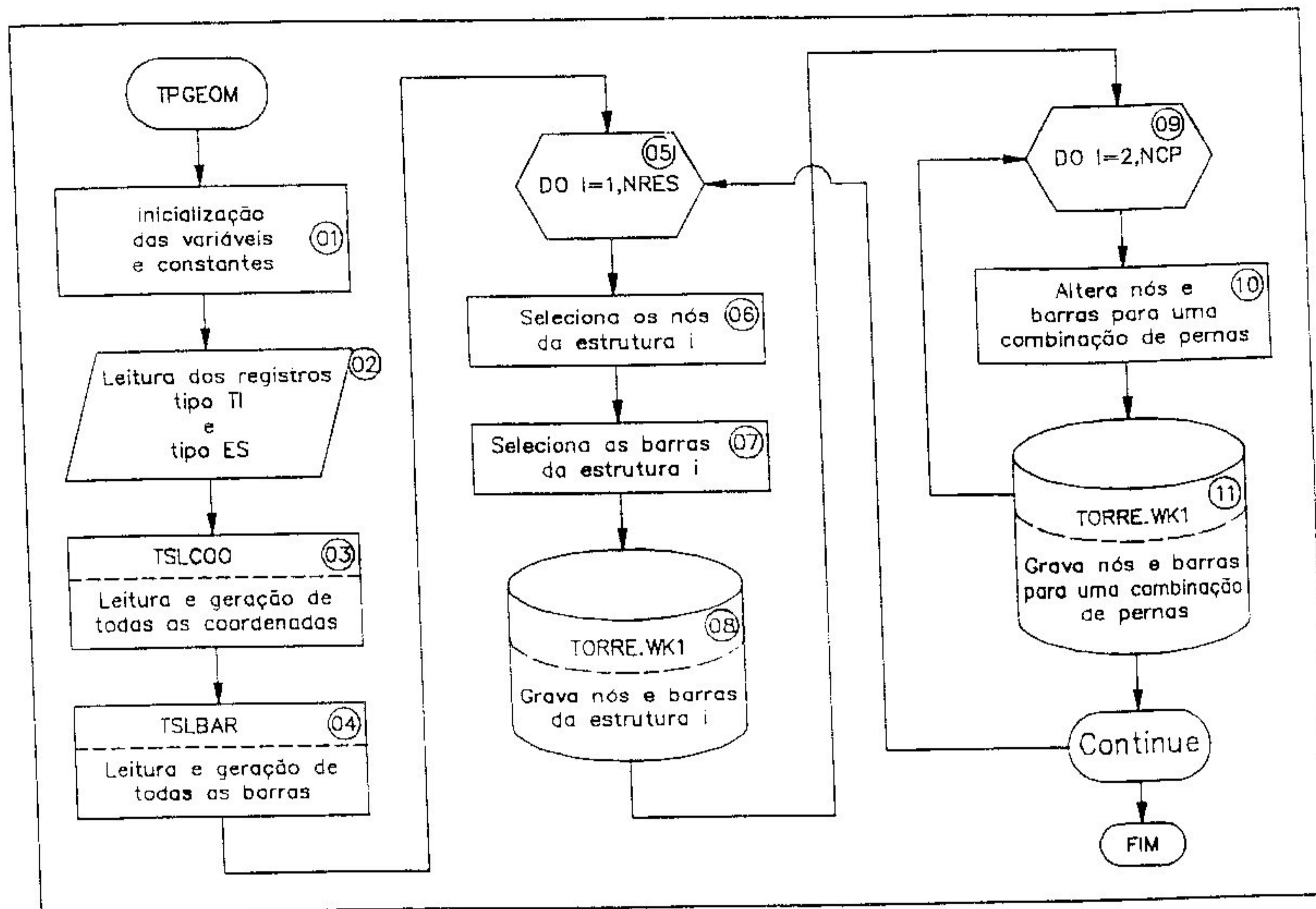


Figura 7.5
Fluxograma da Rotina TPGEOM

- (03) Nesta etapa a subrotina TSLCOO lê os registros do tipo CO (coordenadas dos nós) e gera na memória principal do computador uma tabela com as coordenadas de todos os nós envolvidos no cálculo da família de torres.
- (04) Nesta etapa a subrotina TSLBAR lê os registros do tipo MA (materiais das barras), PR (propriedades das seções das barras) e BA (barras da estrutura) e gera na memória principal do computador uma tabela com as rigidezes axiais e conectividade das barras.
- (05) Nesta etapa começa um controle iterativo, que se estende até o comando CONTINUE, e que será executado NRES vezes.
NRES é igual ao número de registros do tipo ES.
- (06) Nesta etapa a rotina TPGEOM seleciona os nós da estrutura (i) correspondente à estrutura definida no campo CARACTERES COMPONENTES do registro ES.
- (07) Nesta etapa a rotina TPGEOM seleciona as barras da estrutura (i) correspondente à estrutura definida no campo CARACTERES COMPONENTES do registro ES.

- (08) Nesta etapa a rotina TPGEOM grava no arquivo TORRE . WK1 os nós e barras da estrutura (i) anteriormente selecionados.
- (09) Nesta etapa começa um controle iterativo interno que se estende até o comando CONTINUE e que será executado NCP vezes.
NCP é igual ao número de combinações de pernas definido no campo COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL do registro ES.
- (10) Nesta etapa a rotina TPGEOM altera os nós e barras das pernas da estrutura (i) substituindo-os pelos nós e barras das pernas da nova combinação.
- (11) Nesta etapa a rotina TPGEOM grava no arquivo TORRE . WK1 os nós e barras da nova combinação de pernas.

7.3 Geração dos Carregamentos

7.3.1 Descrição dos Registros dos Dados de Entrada — As Figuras 7.6 e 7.7 mostram o *lay-out* dos cinco tipos de registros a serem empregados na codificação dos dados dos carregamentos, detalhados a seguir. Destacamos que esta codificação é necessária quando o usuário utiliza um editor de textos para gerar o arquivo TORRE . DAT. Caso este arquivo seja gerado pelo programa TPGEDA estes formulários [28] servem para mostrar o *lay-out* do arquivo TORRE . DAT.

- **REGISTRO 1** — Neste conjunto de registros são codificados os dados de descrição dos pontos de fixação (nós de ataque) dos cabos na torre. O croqui, anexo ao registro 1, mostra os diversos tipos de ataque possíveis de ocorrerem. A seguir detalhamos os diversos campos deste registro.
 - **Número do Ataque** — Este campo é utilizado para identificar o ponto de fixação de um cabo.
 - **Simetria** — Este campo é utilizado para indicar o código de simetria de um ponto de fixação. Através deste código é possível a geração automática de pontos de fixação simétricos. Adotamos a seguinte convenção:
 - 0 = Ponto de fixação único.
 - 1 = Simetria em relação ao plano YZ. São gerados dois pontos de fixação, um localizado na frente da torre e outro atrás.

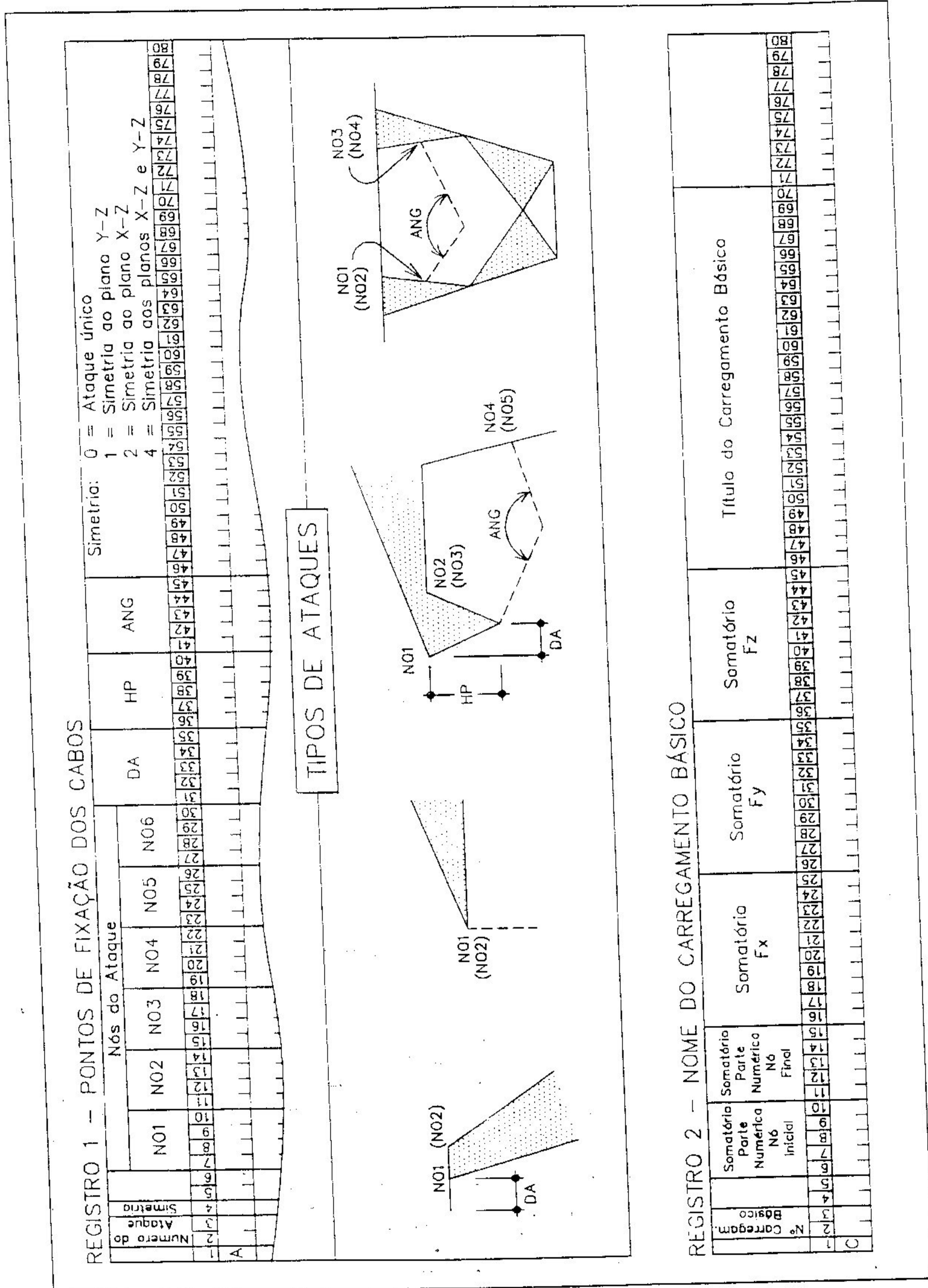


Figura 7.6
 Registros dos Dados de Carregamento de uma Torre
 1ª Parte

- 2 = Simetria em relação ao plano XZ. São gerados dois pontos de fixação, um localizado à esquerda da torre e outro à direita.
- 4 = Simetria dupla. São gerados quatro pontos de fixação situados nos vértices de um retângulo.
- Nós do Ataque — Este campo é utilizado para codificar os nós de fixação das cadeias de isoladores ou das ferragens de sustentação dos cabos.
 - DA — Este campo é utilizado para codificar a distância DA representada no croqui do registro 1.
 - HP — Este campo é utilizado para codificar a altura HP do pêndulo representada no croqui do registro 1.
 - ANG — Este campo é utilizado para codificar o ângulo ANG (entre duas cadeias de isoladores) representado no croqui do registro 1.
- REGISTRO 2 — Utilizamos o registro 2 para identificar um carregamento básico e fornecer informações que permitam fazer testes de consistência de dados. A seguir detalhamos o significado dos campos deste registro.
- Número do Carregamento Básico — Este campo é utilizado para identificar numericamente um carregamento básico.
 - Somatório da Parte Numérica do Nó Inicial — Este campo é utilizado para fornecer o somatório da parte numérica dos nós iniciais de cada um dos conjuntos de nós igualmente carregados, para o carregamento básico em foco.
 - Somatório da Parte Numérica do Nó Final — Este campo é análogo ao anterior referindo-se todavia aos nós finais ao invés dos nós iniciais.
 - Somatório de Fx — Este campo é utilizado para fornecer o somatório das cargas nodais na direção x, para o carregamento básico em foco.
 - Somatório de Fy — Este campo é utilizado para fornecer o somatório das cargas nodais na direção y, para o carregamento básico em foco.
 - Somatório de Fz — Este campo é utilizado para fornecer o somatório das cargas nodais na direção z, para o carregamento básico em foco.
 - Título da Carregamento Básico — Este campo é utilizado para identificar o carregamento básico em foco.

- **REGISTRO 3** — Neste conjunto de registros são codificados todos os carregamentos básicos aos quais a torre estará submetida, tais como: peso próprio da estrutura, cargas devidas à ação do vento e outras cargas não localizadas nos pontos de fixação dos cabos. A cada carregamento básico corresponderá apenas um registro do tipo 2 e tantos registros do tipo 3 quantos necessários. A seguir detalhamos o significado de cada um dos campos deste registro.
 - **Nó Condicionante** — Este campo é utilizado para identificar um nó condicionante único ou o nó condicionante inicial de uma série de nós condicionantes. A existência ou não destes nós na estrutura acarretará ou não a aplicação das cargas indicadas neste registro à estrutura.
 - **Nó Inicial** — Este campo é utilizado para identificar o primeiro de uma série de nós aos quais serão aplicadas frações iguais das cargas indicadas neste registro.
 - **Nó Final** — Este campo é utilizado para identificar o último de uma série de nós aos quais serão aplicadas frações iguais das cargas indicadas neste registro. As cargas serão aplicadas a partir do nó inicial até o nó final e cada fração de carga será obtida pela divisão da carga atuante em uma determinada direção pelo número de nós envolvidos.
 - **F_x** — Este campo é utilizado para codificar o valor da carga na direção do eixo x.
 - **F_y** — Este campo é utilizado para codificar o valor da carga na direção do eixo y.
 - **F_z** — Este campo é utilizado para codificar o valor da carga na direção do eixo z.
 - **Fator de Multiplicação da Carga de Vento** — A ser implementado
- **REGISTRO 4** — Neste conjunto de registros são codificadas as cargas aplicadas nos pontos de fixação dos cabos. A seguir passamos a detalhar o significado dos campos deste registro.
 - **Número do Carregamento Típico** — Este campo é utilizado para identificar numericamente um carregamento típico.
 - **Cabo Intacto** — Este campo é utilizado para codificar, com a condição de

cabo intacto, um carregamento típico constituído das cargas F_x , F_y e F_z aplicadas em um ponto de fixação dos cabos.

- Cabo Rompido — Este campo é utilizado para codificar, com a condição de cabo rompido, um carregamento típico constituído das cargas F_x , F_y e F_z aplicadas em um ponto de fixação dos cabos.
- REGISTRO 5 — Neste conjunto de registros são codificadas as diversas hipóteses de cálculo. A seguir passamos a detalhar o significado dos campos deste registro.
 - Nome da Hipótese — Este campo é utilizado para identificar uma hipótese de carregamento.
 - Fator de Redução das Cargas Verticais — Este campo é utilizado para fornecer o fator de redução das cargas verticais igual à relação entre o vão gravante mínimo e o vão gravante máximo.
 - Fator de Multiplicação das Cargas F_y e F_z — A ser implementado.
 - Cargas Típicas Aplicadas nos Ataques — Este campo é utilizado para codificar o número do carregamento típico aplicado a um ponto de fixação dos cabos, bem como a condição de cabo intacto ou rompido. Os campos 01 a 10 referem-se aos pontos de fixação de 01 a 10. Se necessário, podemos utilizar registros adicionais no caso da existência de mais de dez pontos de fixação. Para a codificação, temos:

$$\left| \underline{N} \mid \underline{N} \mid \underline{R} \mid \right.$$

onde:

NN — Número do carregamento típico.

R — Código do cabo:

Em branco = cabo intacto.

R = cabo rompido.

- Carregamento Básico — Este campo é utilizado para codificar um carregamento básico. Devemos fornecer o número do carregamento básico e os fatores de multiplicação das cargas F_x , F_y e F_z . Se necessário, podemos utilizar registros adicionais no caso da existência de mais de um carregamento básico.

7.3.2 Fluxograma da Rotina TPGCAR — A Figura 7.8 mostra o fluxograma da rotina TPGCAR destinada à geração dos carregamentos a serem usados nos cálculos das torres de uma mesma família. A seguir passamos a detalhar as etapas da rotina TPGCAR.

- (01) Nesta etapa são inicializadas as variáveis e constantes utilizadas na rotina TPGCAR.
- (02) Nesta etapa são lidos os registros do tipo C (nome do carregamento básico) e B (carregamento básico).
- (03) Nesta etapa são montadas, na memória principal, tabelas relativas aos carregamentos básicos.

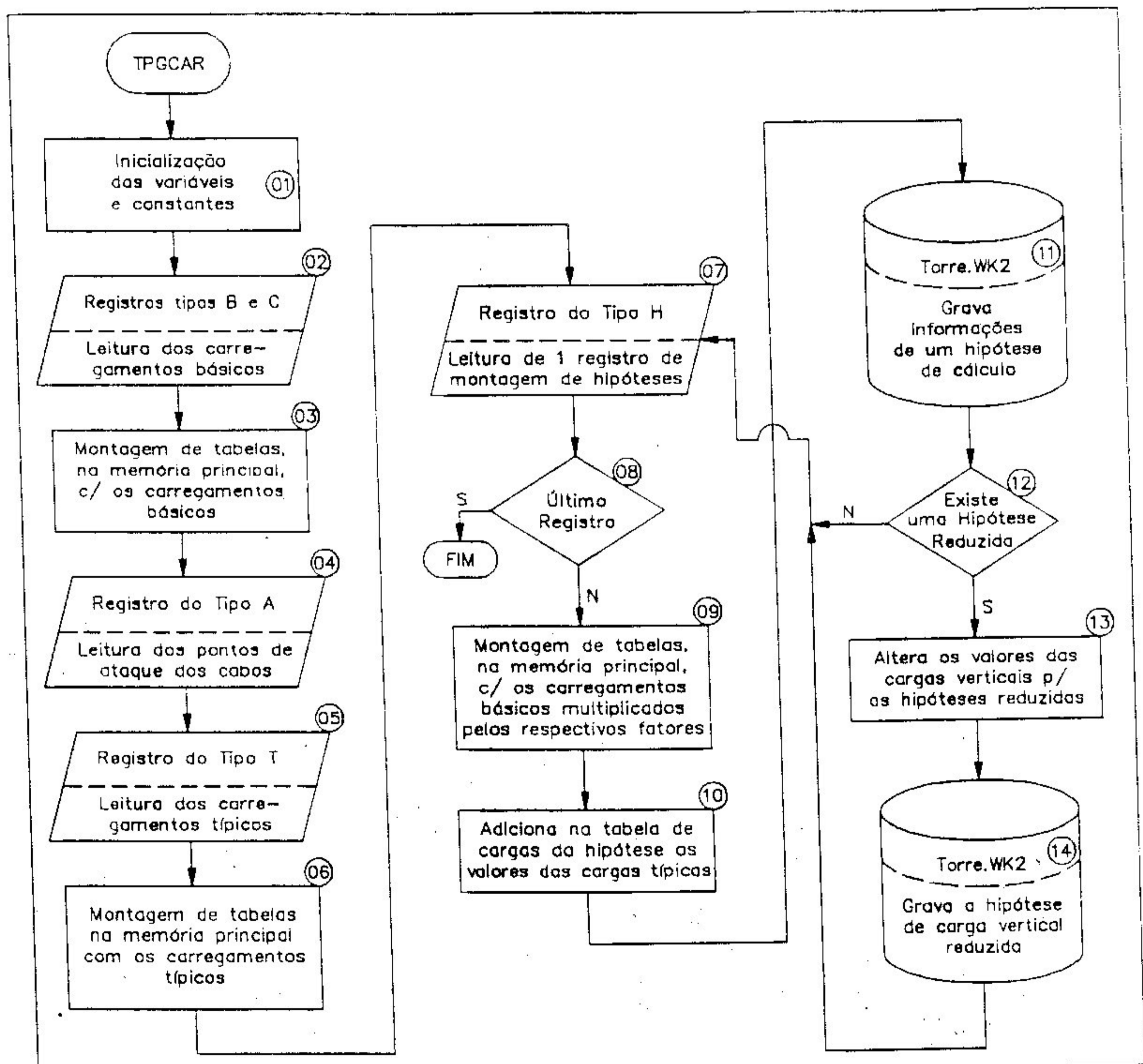


Figura 7.8
Fluxograma da Rotina TPGCAR

- (04) Nesta etapa são lidos os registros do tipo A (pontos de fixação dos cabos).
- (05) Nesta etapa são lidos os registros do tipo T (cargas típicas).
- (06) Nesta etapa são montadas, na memória principal, tabelas relativas às cargas típicas.
- (07) Nesta etapa é lido um registro do tipo H (hipóteses de cálculo).
- (08) Nesta etapa é feito o teste para verificar se o registro lido é do tipo H. Se esta condição for verdadeira, o processamento prosseguirá normalmente pelas demais etapas. Caso contrário, a rotina encerrará o processamento.
- (09) Nesta etapa os carregamentos básicos relativos à hipótese em foco são multiplicados pelo fator de multiplicação das cargas e sucessivamente acumulados.
- (10) Nesta etapa as cargas típicas aplicadas nos pontos de fixação dos cabos são transformadas em cargas nodais e adicionadas à tabela de cargas da hipótese em foco.
- (11) Nesta etapa a rotina TPGCAR grava no arquivo TORRE .WK2 informações relativas a uma hipótese de cálculo, à saber:
 - Nome da hipótese.
 - Nome dos nós condicionantes.
 - Nome dos nó carregados e respectivas cargas nas direções dos eixos x , y e z .
- (12) Nesta etapa é feito um teste para verificar a existência ou não de uma hipótese de carga vertical reduzida. Caso a hipótese exista, a rotina TPGCAR processará as etapas (13), (14) e retornará à etapa (07). Caso a hipótese não exista, retornará à etapa (07).
- (13) Nesta etapa os valores das cargas verticais da hipótese em foco são reduzidos aplicando-se coeficientes de redução já definidos.
- (14) Nesta etapa a rotina TPGCAR grava no arquivo TORRE .WK2 informações relativas à hipótese de carga vertical reduzida. A seguir retorna à etapa (07).

7.4 Cálculo pelo Método dos Deslocamentos

7.4.1 Fluxograma da Rotina TPAETO — A Figura 7.9 mostra o fluxograma da rotina TPAETO utilizada para o cálculo de torres pelo método dos deslocamentos [16], [34], [35] e [38]. A seguir passamos a detalhar as etapas da rotina TPAETO.

- (01) Nesta etapa são inicializadas as variáveis e constantes utilizadas na rotina TPAETO.
- (02) Nesta etapa é lida no arquivo TORRE .WK1 as informações relativas à geometria de uma estrutura.
- (03) Nesta etapa a subrotina AEOTLB otimiza a numeração interna dos nós visando reduzir a largura da banda da matriz de rigidez da estrutura.
- (04) Nesta etapa a subrotina AEMMRI monta a matriz de rigidez da estrutura.

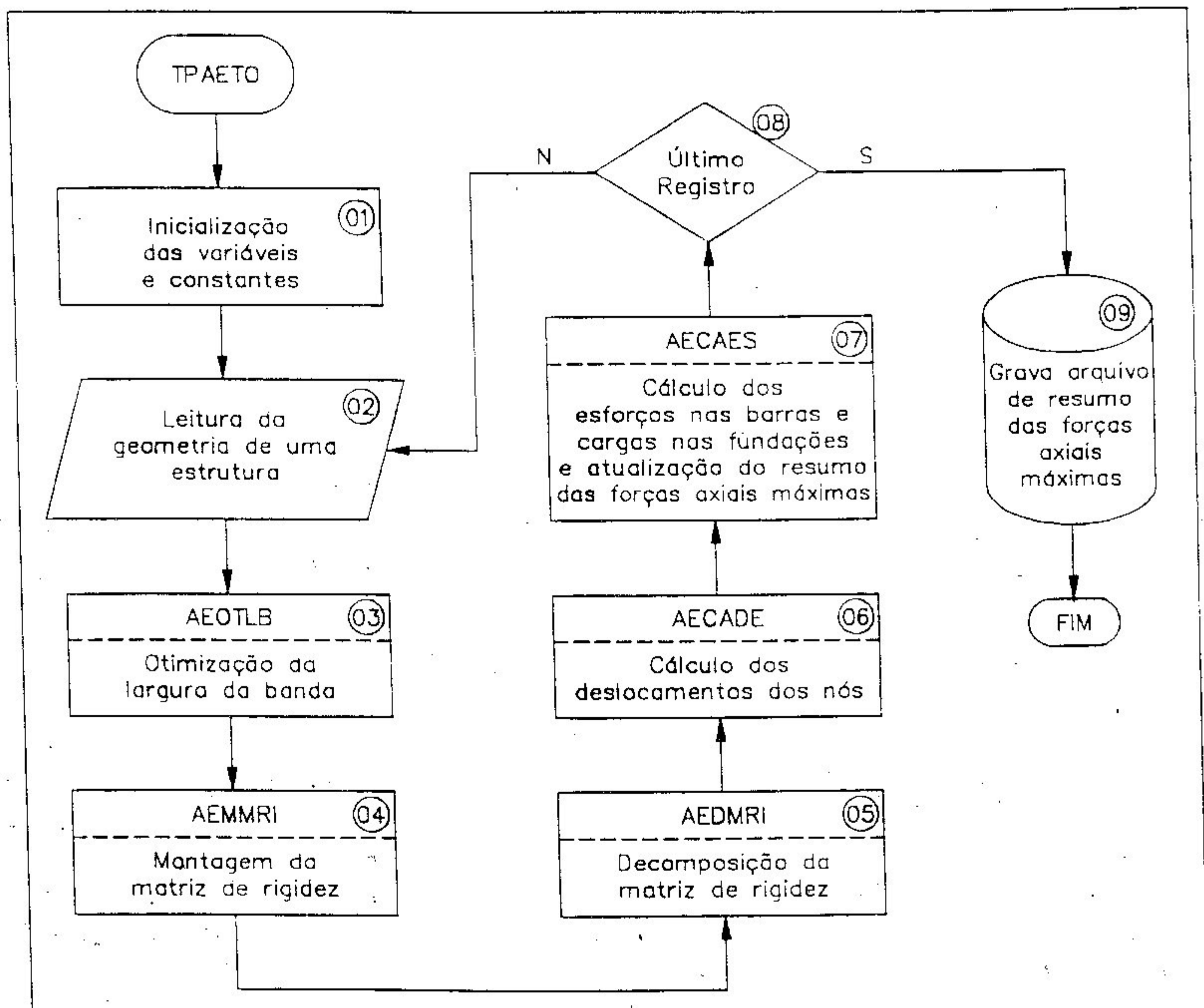


Figura 7.9
Fluxograma da Rotina TPAETO

Esta matriz é armazenada na memória periférica para permitir o cálculo de grandes estruturas.

- (05) Nesta etapa a subrotina AEDMRI decompõe a matriz de rigidez da estrutura, conforme o método de *Cholesky*.
- (06) Nesta etapa a subrotina AECADE calcula os deslocamentos nodais, conforme o método de *Cholesky*.
- (07) Nesta etapa a subrotina AECAES calcula, para cada carregamento, as forças axiais nas barras e as cargas nas fundações e grava esses valores, respectivamente, nos arquivos TORRE . WK3 e TORRE . WK4. À medida que os carregamentos são processados a subrotina AECAES gera e atualiza um resumo das cargas máximas de tração e compressão nas barras e indica as hipóteses de cálculo que produziram tais máximos.
- (08) Nesta etapa é feito um teste para saber se a estrutura processada é a última ou não. Caso não seja a última estrutura, retorna-se à etapa (02). Caso seja a última estrutura, passa-se à etapa (09).
- (09) Nesta etapa o resumo final das forças axiais máximas, gerado na etapa (07), é arquivado na memória periférica para possibilitar, posteriormente, o dimensionamento das barras e ligações. Isto feito, encerra-se o processamento.

7.4.2 Nós Hipostáticos — Como vimos em capítulos anteriores, o cálculo de torres pelo método dos deslocamentos apresenta itens específicos, os quais necessitam de rotinas especiais para que se tenha um bom programa.

Entre esses itens, largamente estudados na literatura especializada, destacamos a

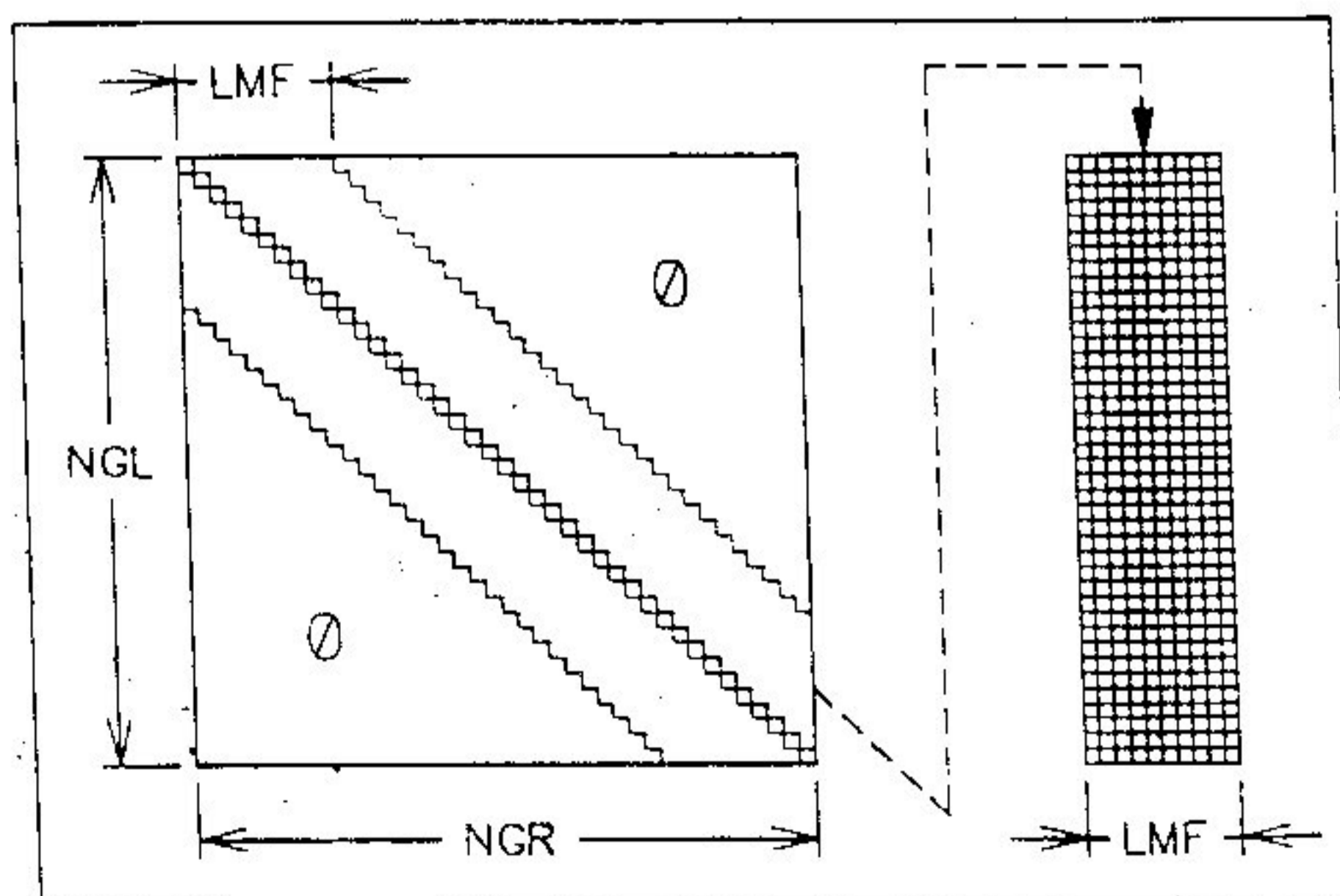


Figura 7.10

Largura da Banda de uma Matriz de Rigidez

renumeração interna dos nós, para minimizar a largura da banda da matriz de rigidez (Figura 7.10), e a solução do sistema de equações.

Todavia, em treliças espaciais uma questão relevante é a dos nós hipostáticos, a qual é, entretanto, pouco tratada pelos pesquisadores. Desta forma, julgamos relevante abordar esse

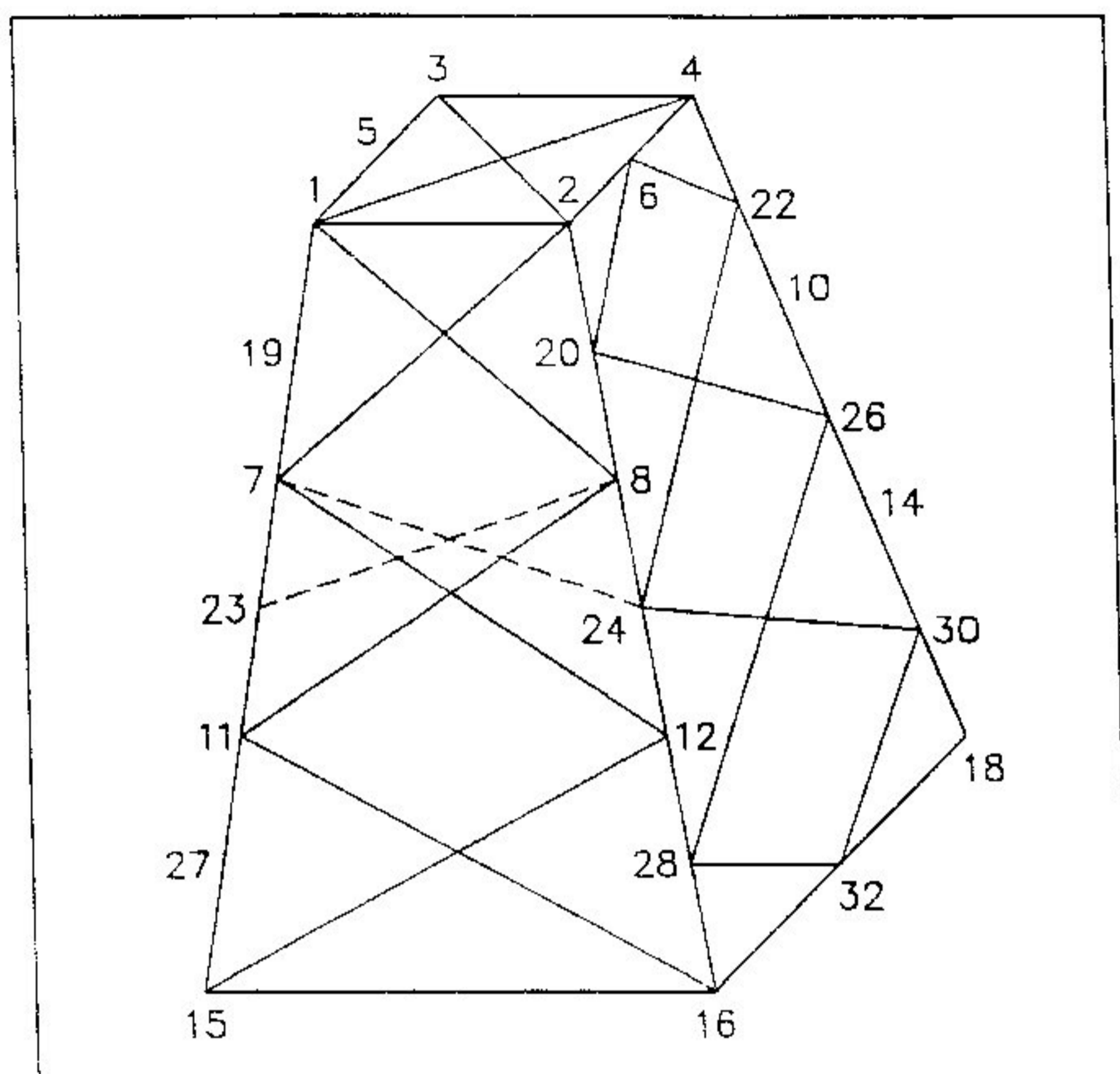


Figura 7.11
Trelliça Espacial com Nós Hipostáticos

assunto, o que faremos a seguir. Os nós hipostáticos, como vimos anteriormente, são aqueles onde as barras concorrentes estão situadas em um mesmo plano. Como exemplo de nós hipostáticos podemos ver na Figura 7.11 que os nós 5 a 14 e 19 a 32 apresentam tal situação. No cálculo de treliças espaciais pelo método dos deslocamentos a presença de um nó hipostático em uma estrutura pode provocar a ocorrência de singularidade na matriz de rigidez.

Para evitar tal singularidade vamos apresentar, a seguir, três técnicas diferentes utilizadas para eliminar a singularidade.

- **Cálculo da Estrutura como Pórtico Espacial** — Esta técnica corresponde a calcularmos a torre como pórtico espacial, isto é, suprimindo total ou parcialmente as rótulas e substituindo-as por ligações rígidas. Neste caso temos que fornecer ao programa as propriedades geométricas das seções transversais necessárias para a análise como pórtico espacial. Como desvantagem em relação à análise da estrutura como treliça espacial, o cálculo de um pórtico espacial consome mais tempo de codificação e análise dos resultados. O tempo de processamento é bem maior e isto se deve ao aumento do número de graus de liberdade da estrutura.
- **Adição Física de Barras Fictícias** — Uma barra fictícia é adicionada ao modelo estrutural quando desejamos evitar uma possível instabilidade em um nó hipostático. Devemos adicionar uma barra para cada nó hipostático existente na estrutura. Uma barra fictícia deve ter pequena rigidez axial e deve unir um nó hipostático a um nó da estrutura de tal forma que ela não fique no mesmo plano das barras que concorrem no nó hipostático. Como exemplo podemos ver na Figura 7.11 que as barras tracejadas 7-24

e 8–23 corrigem a hipostaticidade dos nós 24 e 23, respectivamente.

A principal desvantagem desta técnica é devida ao grande número de barras fictícias normalmente exigido nas torres de transmissão. Isto ocasiona um aumento substancial de trabalho mas poderia ser contornado com a implementação de uma rotina que localizasse estes nós e adicionasse automaticamente as barras fictícias.

- **Adição Simulada de Barras Fictícias** — Nesta técnica evitamos uma possível instabilidade de um nó hipostático com a implementação de uma rotina que altera a matriz de rigidez da estrutura no momento de sua montagem.

Na técnica anterior, as barras fictícias são de fato adicionadas à estrutura alterando a sua geometria inicial, mas nessa técnica isto não ocorre.

O algoritmo adotado simula, no entanto, a adição de uma barra fictícia de pequena rigidez axial, normal ao plano formado pelas barras que concorrem no nó hipostático, e que une o nó hipostático a um apoio fixo qualquer.

7.5 Dimensionamento das Barras e Ligações

7.5.1 Descrição dos Dados de Entrada — A seguir descreveremos sucintamente os arquivos lidos pela rotina TPDIBP necessários ao dimensionamento das barras e ligações [4].

- **Arquivo de Parâmetros (TORRE . DAT)** — Neste arquivo são especificados diversos parâmetros utilizados no dimensionamento, tais como: diâmetro dos parafusos das ligações, limite de resistência ao cisalhamento para o corpo do parafuso, limite de resistência ao esmagamento dos furos das ligações, largura da aba e espessura mínima das cantoneiras.
- **Arquivo de Perfis Disponíveis (PERFIL . TAB)** — Neste arquivo são fornecidas as propriedades geométricas das seções transversais dos perfis disponíveis.
- **Arquivo de Resumo (TORRE . WK3)** — Neste arquivo é fornecido o resumo das forças axiais máximas de cálculo de tração e compressão anteriormente calculadas pela rotina TPAETO, bem como os dados necessários ao dimensionamento das barras e ligações.

7.5.2 Fluxograma da Rotina TPDIBP — A Figura 7.12 mostra o fluxograma da rotina TPDIBP utilizada no dimensionamento das barras e ligações cujas etapas passamos a detalhar.

(01) Nesta etapa são inicializadas as variáveis e constantes utilizadas na rotina TPDIBP.

(02) Nesta etapa são lidos, do arquivo TORRE . DAT, os parâmetros

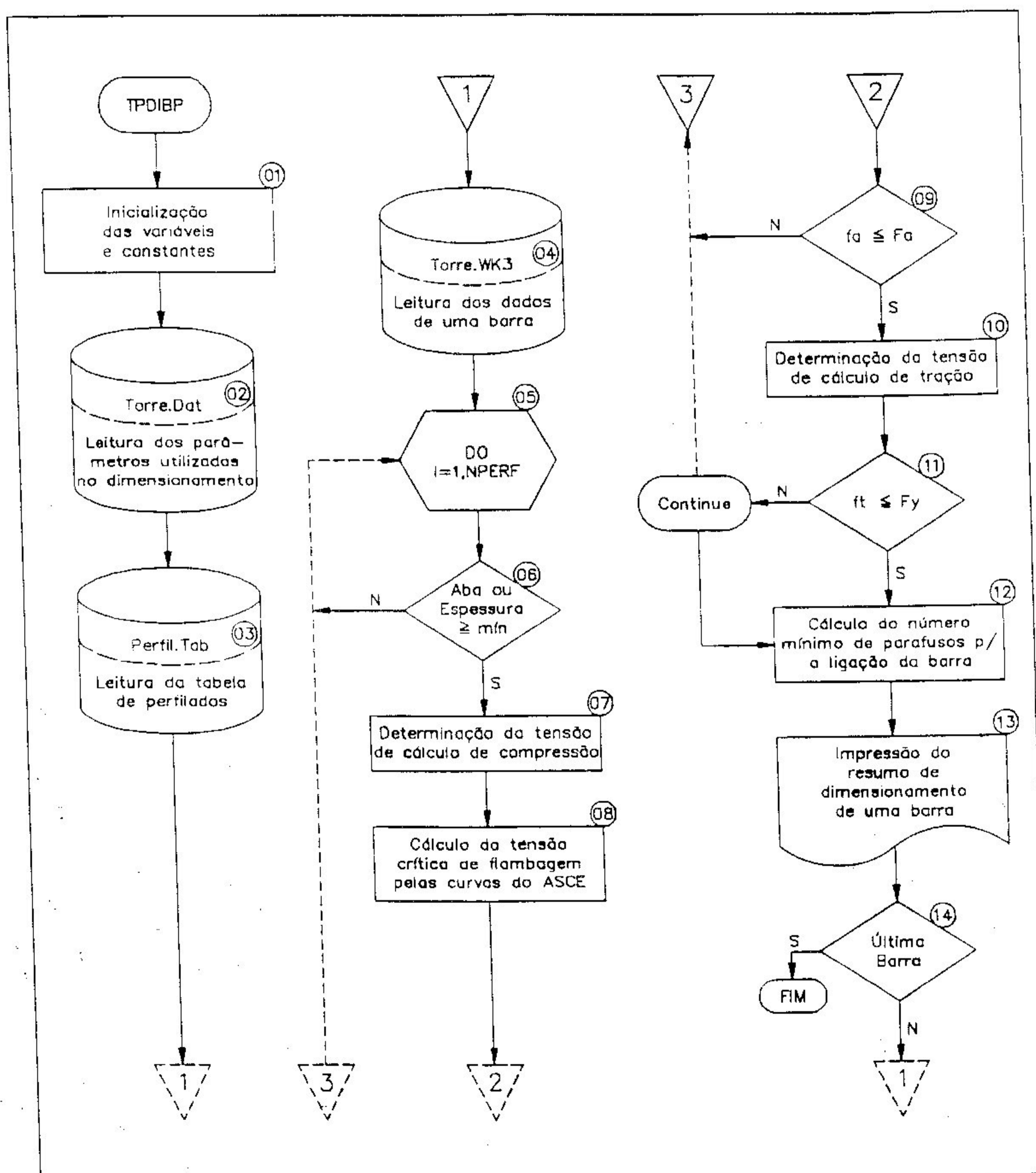
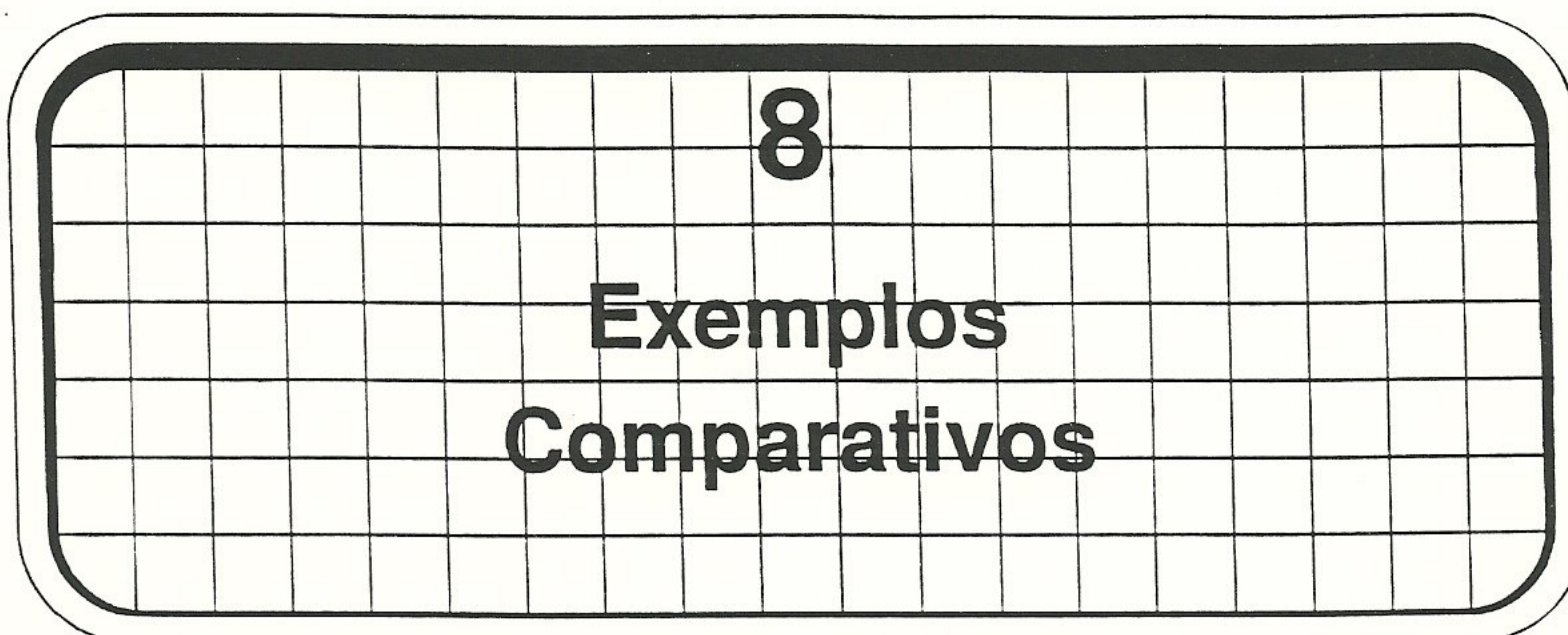


Figura 7.12
Fluxograma da Rotina TPDIBP

necessários no dimensionamento das barras.

- (03) Nesta etapa é lido o arquivo PERFIL . TAB das propriedades geométricas das seções transversais dos perfis disponíveis. A seguir é gerada na memória principal do computador uma tabela com as propriedades geométricas classificadas em ordem crescente de peso ou preço de cada perfil.
- (04) Nesta etapa é lido um registro do arquivo TORRE . WK3 com as forças axiais máximas de cálculo de tração e compressão para a barra em foco bem como os dados necessários ao seu dimensionamento.
- (05) Nesta etapa começa um controle iterativo que se estende até o comando CONTINUE e que será executado sucessivamente até a seleção final do perfil mais econômico.
- (06) Nesta etapa é feita a verificação das dimensões mínimas da cantoneira. Se a largura das abas ou a espessura da cantoneira forem menores que o mínimo especificado para o projeto, a rotina passará a pesquisar o próximo perfil da tabela.
- (07) Nesta etapa é calculada a tensão de cálculo de compressão.
- (08) Nesta etapa é calculada a tensão crítica de flambagem utilizando-se as curvas da ASCE.
- (09) Nesta etapa é feito um teste para saber se a tensão de cálculo de compressão f_a não supera a tensão crítica de flambagem F_a .
Em caso negativo a rotina irá pesquisar o próximo perfil da tabela.
- (10) Nesta etapa é calculada a tensão de cálculo de tração.
- (11) Nesta etapa é feito um teste para saber se a tensão de cálculo de tração f_t não supera o limite de escoamento F_y .
Em caso negativo a rotina irá pesquisar o próximo perfil da tabela.
- (12) Nesta etapa, após selecionado o perfil, a rotina calculará o número mínimo de parafusos para as ligações da barra.
- (13) Nesta etapa faz-se a impressão do resumo de dimensionamento da barra em foco.
- (14) Nesta etapa é feito um teste para saber se a barra em foco é a última.
Em caso afirmativo a rotina encerrará o processamento.



8.1 Processo Clássico *versus* Método dos Deslocamentos

Vimos, em capítulos anteriores, que o cálculo das torres de linhas de transmissão pode ser executado de duas formas distintas.

A primeira, denominada processo clássico e mostrada no Capítulo 4, utiliza expressões obtidas pelos processos do equilíbrio dos nós, das seções e de *Cremona*. Seu emprego mais comum é em cálculos de ante-projetos e na verificação expedita dos resultados obtidos pelos programas de computador que utilizam o método dos deslocamentos.

A segunda, denominada método dos deslocamentos e detalhada no Capítulo 7, é atualmente a mais utilizada para a análise de torres. Ao longo dos últimos anos, graças ao avanço das técnicas computacionais e da disponibilidade cada vez maior de computadores, o método dos deslocamentos foi gradativamente substituindo o processo clássico.

Como primeiro exemplo para podermos comparar resultados, a família de torres da Figura 8.1 (1ª Parte e 2ª Parte) foi calculada pelos dois processos, com todas as suas extensões e com pernas desniveladas. As hipóteses de carregamento utilizadas no cálculo são mostradas na Figura 8.2. Adotamos para a identificação de uma hipótese a sistemática detalhada no Capítulo 3. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 8.1 e a comparação dos mesmos indica que as forças axiais nas barras sofrem uma variação acentuada em alguns casos, como mostrado nas colunas DESL/CLAS cujos valores foram obtidos dividindo-se as forças axiais calculadas pelo método dos deslocamentos e pelo processo clássico.

Em particular, destacamos os seguintes aspectos:

- 1) As diagonais T2T e T4T, situadas na cabeça da torre entre as mísulas, apresentaram diferenças nas forças axiais acima da média (diferenças com valores que chegam a alcançar o máximo de 36%).
- De modo geral, quando calculadas pelo método dos deslocamentos, as forças axiais nestas diagonais superam as calculadas pelo processo clássico. Logo, caso estas forças sejam obtidas pelo processo clássico torna-se necessário majorá-las ao dimensionar as diagonais.

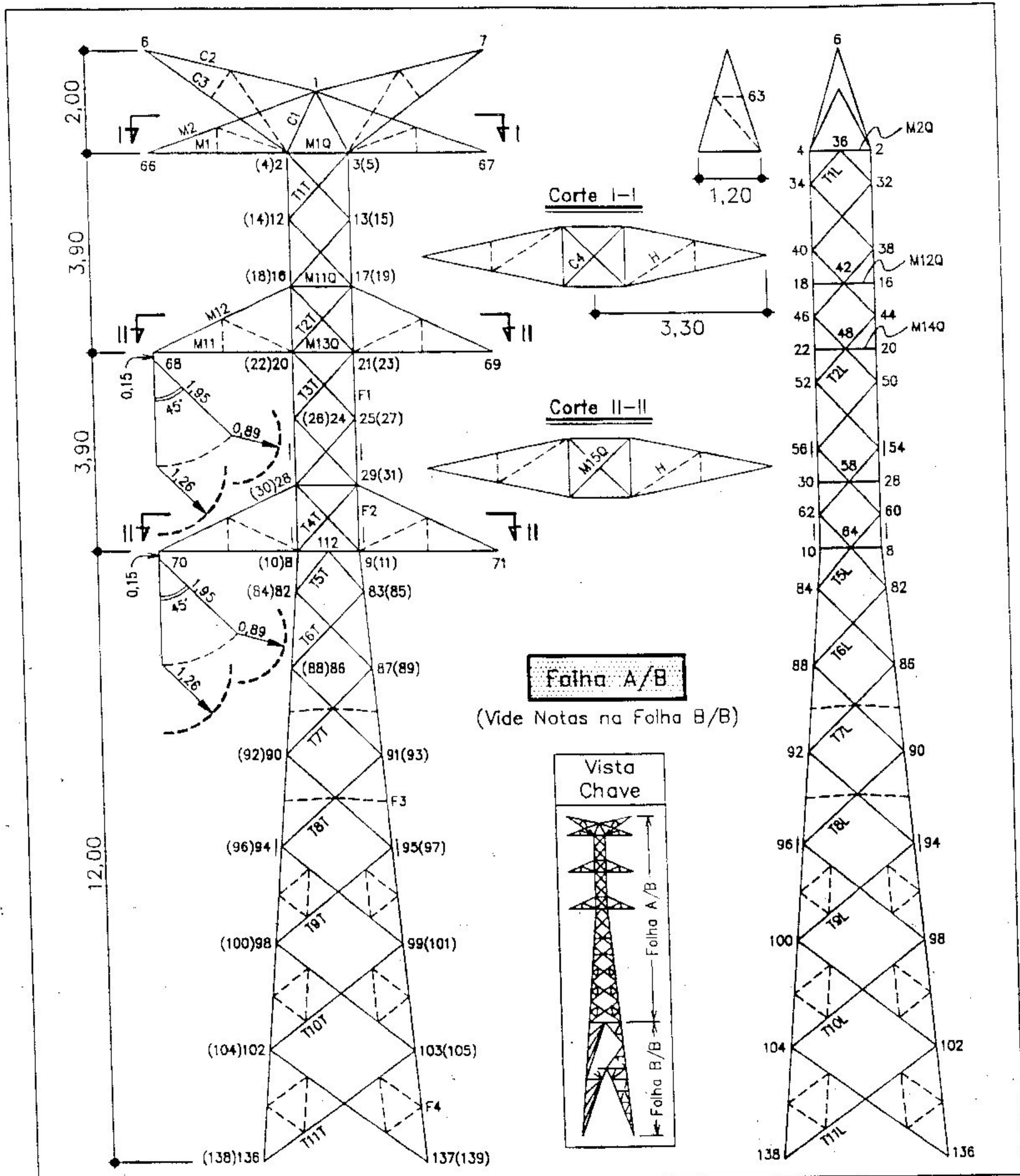


Figura 8.1 - 1ª Parte
Torre Tipo SSA - LT 138 kV

2) Os montantes F4 e F5 do tronco inferior apresentaram uma diferença na força axial da ordem de 10%, o maior valor referindo-se ao cálculo pelo método dos deslocamentos. Às vezes, por questão de prazo de entrega da planilha do projeto, somos forçados a utilizar o processo clássico por ser mais rápido. Neste caso, para evitar problemas ao fazermos o projeto definitivo utilizando o método dos deslocamentos, devemos trabalhar com uma margem de segurança de 8 a 10% para as tensões atuantes nos montantes do tronco inferior.

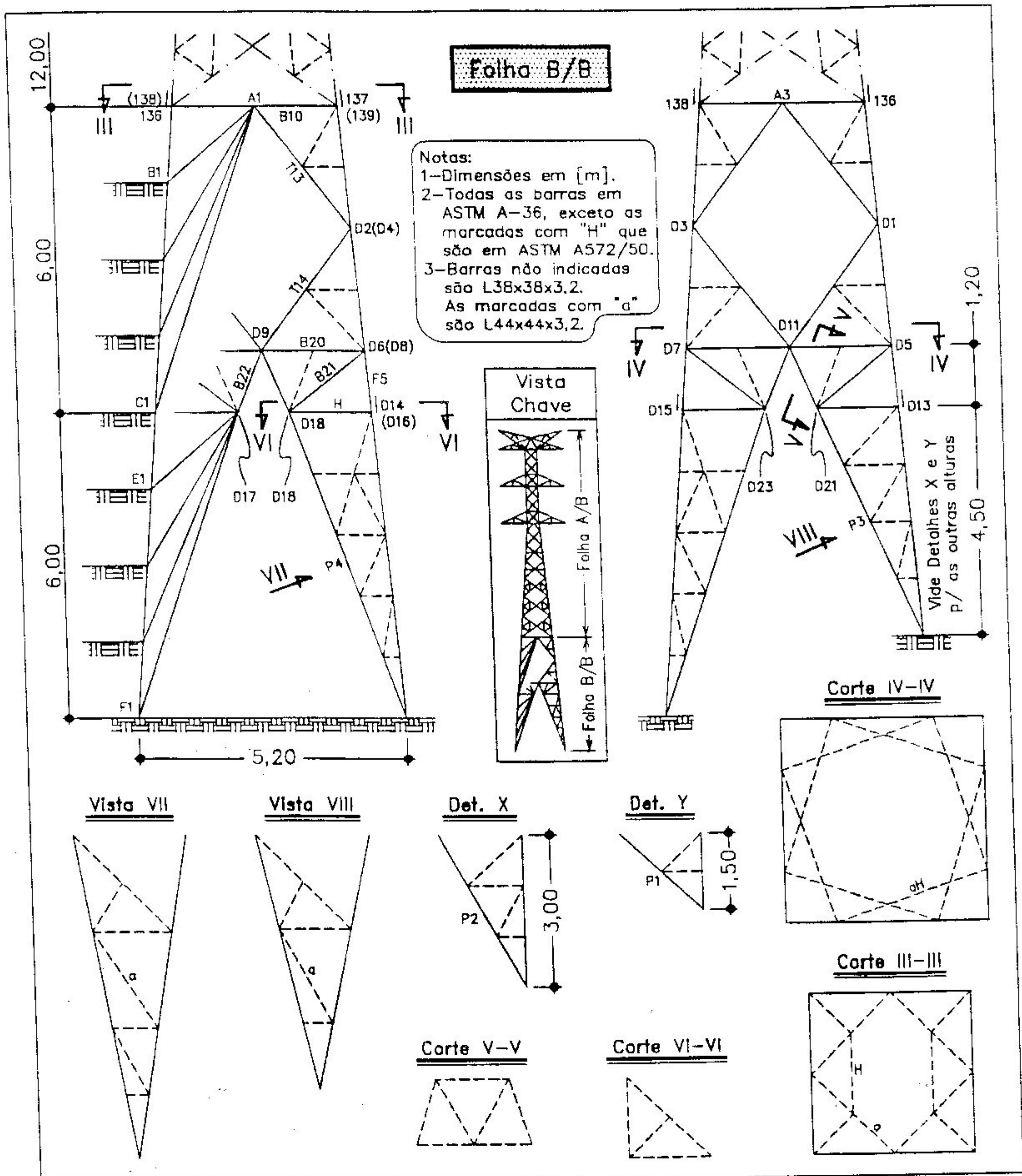
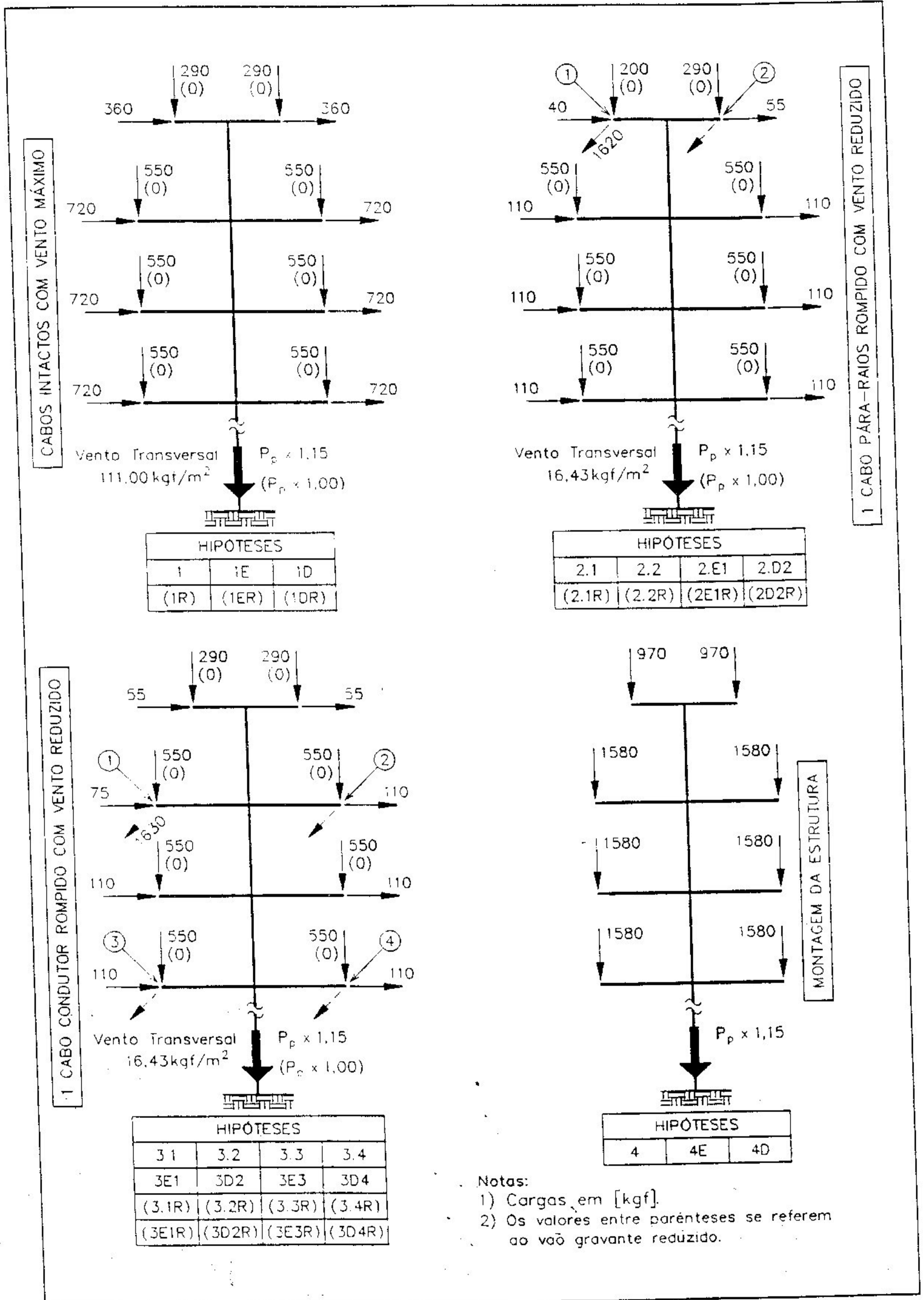


Figura 8.1 - 2ª Parte
 Torre Tipo SSA - LT 138 kV



Notas:

1) Cargas em [kgf].

2) Os valores entre parênteses se referem ao vão gravante reduzido.

Figura 8.2
Hipóteses de Carregamento

Ainda quanto à diferença apresentada na força axial dos montantes do tronco inferior, ao serem calculados pelo método dos deslocamentos e pelo processo clássico, devemos observar que:

- Apenas nos montantes das pernas e nos montantes das emendas das bases com as pernas ocorrem diferenças importantes nas forças axiais, o maior valor correspondendo sempre ao cálculo pelo método dos deslocamentos.
- Esta diferença reduz-se acentuadamente quando as pernas da torre são niveladas.

Tabela 8.1 — Exemplo 1										
Torre da Figura 8.1 — 1ª e 2ª Parte										
Forças Axiais nas Barras — Pernas Desniveladas										
Barra	Compressão [kgf]					Tração [kgf]				
	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl Clas	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl Clas
	Hip.	Força	Hip.	Força		Hip.	Força	Hip.	Força	
C1	4D	4175	4E	4175	1,000					
C2	1ER	562	1R	562	1,000	4E	2123	4	2122	1,000
C3	2D2	4951	2.1	4950	1,000					
C4	2.2	1030	3.1	1008	1,022					
M1	3.1	4352	3.1	4351	1,000					
M2						4E	4623	4	4623	1,000
M11	3.4	4216	3.3	4215	1,000					
M12						4	1871	4	1857	1,008
M15Q	4	1199	3.1	1008	1,189					
F1	1	10192	1	9860	1,034					
F2	1	13058	1	12756	1,024					
T1T	2.2	2143	3.1	1791	1,197	2.2	2143	3.1	1791	1,197
T2T	2.2	2414	3D2	2152	1,122	2E1	2424	3D2	2152	1,126
T3T	2.2	2311	3.1	1900	1,216	2.2	2311	3.1	1900	1,216
T4T	2.1	3009	3D2	2220	1,355	2D2	3115	3D2	2220	1,403
T1L	3.2	2198	3.1	2252	0,976	3.2	2198	3.1	2252	0,976
T2L	3.2	2271	3.1	2252	1,008	3.2	2271	3.1	2252	1,008
F3	1	18280	1	17990	1,016					
F4	1	21547	1	19655	1,096					
F5	1	23554	1	22021	1,070					

Tabela 8.1 — Exemplo 1 (final)										
Torre da Figura 8.1 — 1ª e 2ª Parte										
Forças Axiais nas Barras — Pernas Desniveladas										
Barra	Compressão [kgf]					Tração [kgf]				
	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl
	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas
T5T	2D2	2241	2E1	2166	1,035	2D2	2241	2E1	2166	1,034
T6T	2D2	1705	2E1	1648	1,035	2D2	1705	2E1	1648	1,035
T7T	2D2	1410	2E1	1363	1,034	2D2	1410	2E1	1363	1,034
T8T	2D2	1193	2E1	1136	1,050	2E1	1157	2E1	1136	1,018
T9T	2E1	966	2E1	948	1,019	2D2	996	2E1	948	1,051
T10T	2E1	905	2E1	847	1,068	2D2	845	2E1	847	0,998
T11T	2E1	722	2E1	724	0,997	2D2	774	2E1	724	1,069
T5L	3.3	2466	3.3	2391	1,031	3.3	2466	3.3	2391	1,031
T6L	3.3	1877	3.3	1820	1,031	3.3	1877	3.3	1820	1,031
T7L	3.4	1552	3.3	1505	1,031	3.3	1552	3.3	1505	1,031
T8L	3.4	1284	3.3	1227	1,046	3.3	1248	3.3	1227	1,017
T9L	3.4	1042	3.3	1024	1,018	3.4	1072	3.3	1024	1,047
T10L	3.4	942	3.3	884	1,066	3.4	881	3.3	884	0,997
T11L	3.4	754	3.3	756	0,997	3.4	805	3.3	756	1,065
B10	1	702	1E	625	1,123	1	663	1E	625	1,061
T13	1	1134	1E	1044	1,086	1	1134	1E	1044	1,086
T14	1	907	1E	835	1,086	1	907	1E	835	1,086
B20	1D	371	1E	871	0,426	1E	371	1E	871	0,426
B21	1R	660	1E	516	1,279	1	662	1E	516	1,283
B22	1E	2273	1E	2273	1,000	1E	2273	1E	2273	1,000
P1	1	1433	1E	1350	1,061	1R	1427	1E	1350	1,057
P4	1D	2316	1E	2315	1,000	1E	2316	1E	2315	1,000

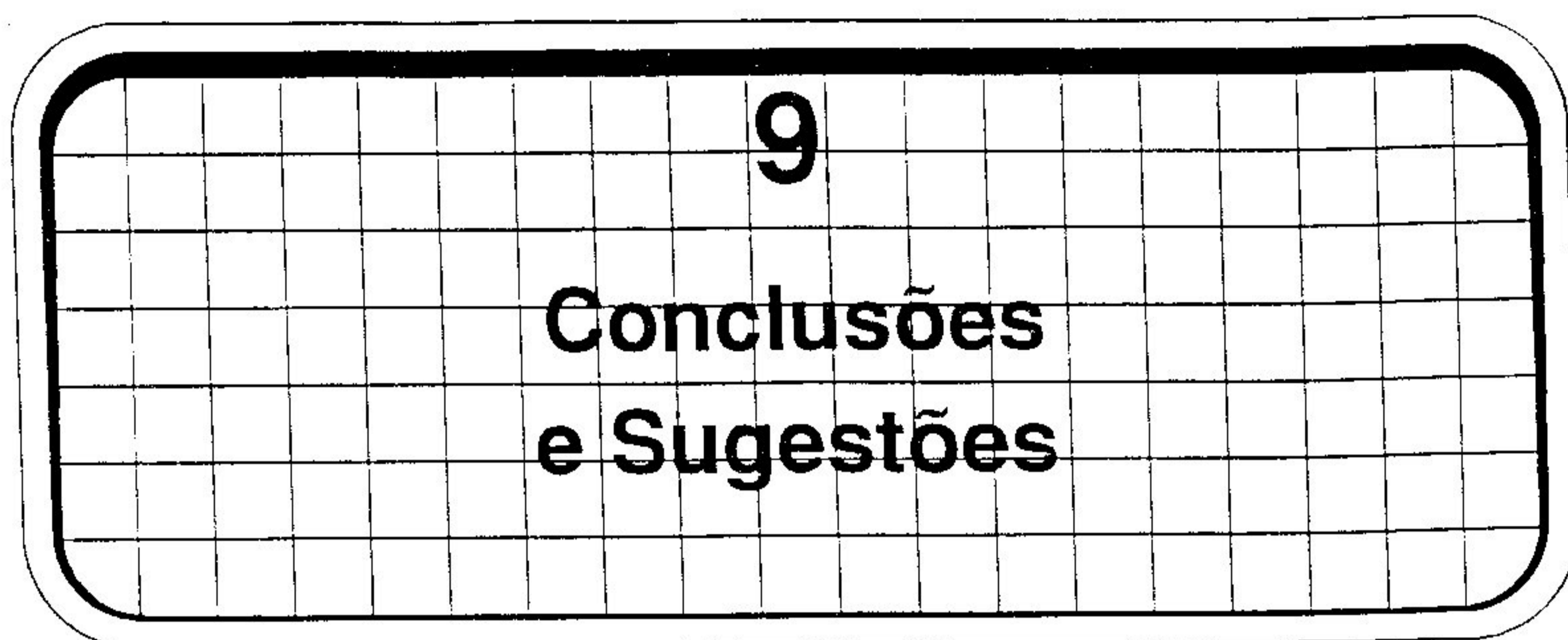
Como um segundo exemplo comparativo, a torre da Figura 8.1 (1ª Parte e 2ª Parte), anteriormente analisada, foi ligeiramente alterada e recalculada. A alteração consistiu em reposicionar as quatro diagonais T5T, situadas na face transversal da torre, no primeiro painel do tronco inferior, que passam a ter os nós 8, 9, 10 e 11 situados na cintura da torre, como iniciais.

Os resultados obtidos (Tabela 8.2) com os dois processos evidenciaram diferenças da ordem de 10%, nas forças axiais de todas as diagonais da face transversal do tronco inferior, os maiores valores correspondendo ao cálculo pelo método dos deslocamentos.

Tabela 8.2 — Exemplo 2										
Torre da Figura 8.1 — 1ª e 2ª Parte										
Forças Axiais nas Barras — Pernas Desniveladas										
Barra	Compressão [kgf]					Tração [kgf]				
	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl
	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas
C1	4D	4175	4E	4175	1,000					
C2	1R	562	1R	562	1,000	4	2123	4	2122	1,000
C3	2E1	4951	2.1	4950	1,000					
C4	2.2	1030	3.1	1008	1,022					
M1	3.1	4352	3.1	4351	1,000					
M2						4	4623	4	4623	1,000
M11	3.4	4216	3.3	4215	1,000					
M12						4	1871	4	1857	1,008
M15Q	3.3	1132	3.1	1008	1,123					
F1	1	10146	1	9860	1,029					
F2	1	13072	1	12756	1,025					
T1T	2.2	2161	3.1	1731	1,207	2.2	2161	3.1	1791	1,207
T2T	2.2	2714	3D2	2152	1,261	2D2	2930	3D2	2152	1,362
T3T	3.2	2017	3.1	1900	1,062	3.1	2017	3.1	1900	1,062
T4T	2.2	3024	3D2	2220	1,362	2D2	3115	3D2	2220	1,403
T1L	3.1	2197	3.1	2252	0,976	3.1	2197	3.1	2252	0,976
T2L	3.1	2290	3.1	2252	1,017	3.1	2290	3.1	2252	1,017
F3	1	18294	1	17990	1,017					
F4	1	21545	1	19655	1,096					
F5	1	23560	1	22021	1,070					
T5T	3E3	1711	2E1	1557	1,099	2D2	1590	2E1	1557	1,021
T6T	2D2	1684	2E1	1648	1,022	3D4	1812	2E1	1648	1,100
T7T	3E3	1498	2E1	1363	1,099	2E1	1393	2E1	1363	1,022
T8T	2D2	1179	2E1	1136	1,038	3E3	1229	2E1	1136	1,082
T9T	3E3	1026	2E1	948	1,082	2E1	984	2E1	948	1,038
T10T	2D2	895	2E1	847	1,057	3D4	897	2E1	847	1,059
T11T	3E3	767	2E1	724	1,059	2E1	765	2E1	724	1,057
T5L	3.3	2497	3.3	2391	1,023	3.3	2497	3.3	2391	1,023
T6L	3.4	1863	3.3	1820	1,024	3.3	1863	3.3	1820	1,024
T7L	3.3	1540	3.3	1505	1,023	3.4	1540	3.3	1505	1,023
T8L	3.4	1274	3.3	1227	1,038	3.4	1238	3.3	1227	1,009
T9L	3.4	1033	3.3	1024	1,009	3.3	1063	3.3	1024	1,038

Tabela 8.2 — Exemplo 2 (final)										
Torre da Figura 8.1 — 1ª e 2ª Parte										
Forças Axiais nas Barras — Pernas Desniveladas										
Barra	Compressão [kgf]					Tração [kgf]				
	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl	Met. Desloc.		Proc. Clássico		Desl
	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas	Hip.	Força	Hip.	Força	Clas
T10L	3.4	935	3.3	884	1,058	3.4	874	3.3	884	0,989
T11L	3.4	748	3.3	756	0,989	3.4	799	3.3	756	1,057
B10	1R	693	1E	625	1,109	1	676	1E	625	1,082
T13	1	1135	1E	1044	1,087	1	1135	1E	1044	1,087
T14	1	908	1E	835	1,087	1	908	1E	835	1,087
B20	1E	371	1E	871	0,426	1E	371	1E	871	0,426
B21	1R	660	1E	516	1,279	1	663	1E	516	1,285
B22	1E	2273	1E	2273	1,000	1E	2273	1E	2273	1,000
P1	1	1434	1E	1350	1,062	1R	1428	1E	1350	1,058
P4	1D	2316	1E	2315	1,000	1D	2316	1E	2315	1,000

No Apêndice A apresentamos o arquivo dos dados de entrada da estrutura do primeiro exemplo e as listagens dos resultados obtidos pelo cálculo com a utilização do método dos deslocamentos.



9.1 Conclusões

O processo clássico, como se comentou no Capítulo 4, foi largamente empregado no passado na elaboração das memórias de cálculo de torres. Atualmente sua aplicação restringe-se a cálculos de ante-projeto de torres do tipo tronco-piramidal e na verificação expedita de resultados obtidos pelos programas de computador que utilizam o método dos deslocamentos. Sua principal vantagem reside na rapidez da preparação dos dados de entrada quando comparado com o método dos deslocamentos. Sua utilização, todavia, deve ser feita com critério, pois seus resultados, em geral, diferem dos obtidos pelo método dos deslocamentos.

O método dos deslocamentos, cuja automatização foi detalhada no Capítulo 7, conduz a resultados mais precisos do que os obtidos com o processo clássico. Tem a desvantagem de exigir a codificação de um número muito grande de dados para a geração da geometria e carregamento da torre. Este fato ocasiona a ocorrência de um maior número de erros que requerem um número apreciável de horas para serem detectados e corrigidos.

A esta altura é evidente que as torres para linhas de transmissão se diferenciam muito dos demais tipos de estruturas, já que apresentam características próprias quanto à sua geometria e quanto aos carregamentos a que ficam submetidas. Por esta razão, os programas genéricos de análise estrutural não são adequados para a determinação dos deslocamentos, cargas nas fundações e esforços nas barras das torres. Justifica-se, portanto, o desenvolvimento de um sistema computacional que leve em conta a especificidade da torre a fim de minimizar a entrada de dados relativa à geração da sua geometria e carregamentos.

9.2 Sugestões

Apresentamos, a seguir, uma síntese dos programas de computador detalhados neste trabalho:

- Geração da geometria da torre.
- Geração do carregamento da torre.
- Cálculo da torre pelo método dos deslocamentos.
- Dimensionamento das barras e ligações.

Naturalmente, outros programas de computador podem ser desenvolvidos para automatizar ao máximo o projeto de linhas de transmissão. Consideramos como relevantes e objeto de futuras pesquisas o desenvolvimento de programas relativos aos itens que passamos a discutir.

9.2.1 Locação de Torres por Computador — Como sabemos, a locação das torres de uma linha de transmissão é um processo longo e exaustivo uma vez que devemos levar em consideração diversos fatores, tais como:

- Levantamento topográfico da linha de transmissão mostrando distâncias progressivas e cotas dos perfis principal e lateral.
- Características mecânicas dos terrenos.
- Ângulos de desvio de rota da linha.
- Locais impróprios para a locação de torres.
- Condutor a ser usado.
- Distâncias de segurança.

Desta forma a utilização de um programa de computador para local as torres ocasionará uma redução considerável no tempo de projeto, bem como uma possível redução de custo da linha de transmissão.

9.2.2 Cálculo das Fundações — Uma maior automatização no projeto das torres pode ser obtida com a implementação de programas de análise estrutural integrados com rotinas de cálculo e de dimensionamento de fundações.

Tais rotinas devem ser elaboradas para cada tipo de fundação, tais como: grelha metálica, tubulão com *stub*, sapata com *stub*, bloco sobre estacas ou tubulões e chumbadores com placa de base.

Além disto para o cálculo das fundações, em geral, são utilizadas apenas as cargas máximas relativas às torres com a menor e maior extensão de

corpo. Seria interessante verificar a economia obtida no custo da linha de transmissão projetando-se fundações distintas para cada extensão de torre.

9.2.3 Análise Conjunta da Torre e Fundação — Algumas licitações para linhas de transmissão são feitas em duas etapas: uma para o fornecimento das estruturas e outra para a montagem da linha de transmissão. A licitadora poderá se auto-penalizar caso opte pelo fornecedor que, cumprindo as especificações de projeto, vier a oferecer o peso mais leve para as estruturas (com menor preço), sem considerar as fundações requeridas pelas mesmas.

Uma maior redução de custo de uma linha de transmissão pode ser alcançada com a análise conjunta das torres e suas fundações. A importância desta análise será tanto maior quanto maiores forem as cargas nas fundações e se torna mais crítica ainda quando o trajeto da linha passar por terrenos com pouca resistência mecânica.

Portanto, o desenvolvimento de um programa de computador que possibilite fazer a análise conjunta da torre e fundação é fundamental para viabilizar esta redução de custo.

9.2.4 Análise em Segunda Ordem — Um programa de cálculo de torres seria mais abrangente com a inclusão de rotinas que permitissem a análise em segunda ordem considerando a estrutura deformada. Em particular, o programa deveria possibilitar a análise de torres estaiadas, largamente utilizadas como estrutura de suspensão, bem como a análise de torres compostas de treliças e cabos.

9.2.5 Postes Tubulares — Outra solução estrutural para as linhas de transmissão é a utilização de postes tubulares em substituição às torres treliçadas. Sua adoção poderá ser feita por razões econômicas, dada à redução de custo representada pela economia na desapropriação da faixa de terreno, ou para a redução do impacto ambiental provocado pelas torres.

É oportuno observar que um programa de computador para a análise de postes tubulares é mais simples do que um para a análise de torres.

9.2.6 Programas Mais Amigáveis — Os programas apresentados neste texto podem ser considerados *amigáveis* uma vez que aliviam bastante, pela automação da geração dos dados de entrada, o trabalho do projetista de torres.

No entanto, nos últimos anos o uso de microcomputadores tem aumentado consideravelmente o íntimo contato entre projetista e máquinas, exige

que os programas desenvolvidos para este tipo de equipamento sejam cada vez mais *amigáveis*.

Nestes programas o processador é basicamente o mesmo dos programas tradicionais, as principais modificações ocorrendo no pré-processador, e no pós-processador sempre com o objetivo de facilitar sua utilização e aumentar a capacidade de análise.

Em particular, o uso da computação gráfica facilita enormemente a arte de projetar e analisar.

9.2.7 Otimização do Processo Global — Como última sugestão, que reconhecemos ser trabalho para uma equipe de pesquisadores, propomos a otimização do processo global com a implementação de um sistema envolvendo a locação da linha de transmissão, cálculo e detalhamento das torres e automação da fabricação.

Em todas estas etapas devem ser desenvolvidos programas de computador com a participação de especialistas dos vários setores.

Referências Bibliográficas

- 1) AISC - American Institute of Steel Construction Inc.; *Manual of Steel Construction*; Ninth Edition, Chicago, 1989.
- 2) AISI - American Iron and Steel Institute; *Cold-Formed Steel Design Manual*; Washington, 1986.
- 3) ALLEN, H.G. and BULSON, P.S.; *Background to Buckling*; McGraw-Hill Book Company Limited, London, 1980.
- 4) ASCE - American Society of Civil Engineers; *Guide for Design of Steel Transmission Towers*; Chattanooga, Tennessee, 1986.
- 5) BENEVOLO, N.; *Torres para Linhas de Transmissão*; Fascículo nº 14, Convênio PUC/RJ e UMSA, Rio de Janeiro.
- 6) BOWLES, G.E.; *Interactive Graphic Tower Design Yields Major Savings*; Transmission & Distribution, USA, 1982.
- 7) BUBLITZ, D.B. e outros; *Análise de Torres Estaiadas*; UFRGS, Porto Alegre, 1986.
- 8) CARNASCIALI, C.C.; *Estruturas Metálicas na Prática*; Macgraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1978.
- 9) CIGRE; *Loading and Strength of Overhead Transmission Lines*; Working Group 08 (Transmission Line Structures), 1988.
- 10) COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade; *Coletânea de Normas - Linhas de Transmissão*; ABNT, Rio de Janeiro, 1985.
- 11) CREDER, H.; *Instalações Elétricas*; Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, Rio de Janeiro, 1991.

- 12) FADDEEVA, V.N.; *Computational Methods of Linear Algebra*; Dover Publications Inc., New York, 1959.
- 13) FINZI, M.; *Cold-Formed Technology in the Design and Construction of High Voltage Transmission Towers*; Trabalho nº 22-90(GT-08)08, CIGRE-Brasil, Rio de Janeiro, 1990.
- 14) FUCHS, R.D. e ALMEIDA, M.T.; *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*; Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1982.
- 15) FUCHS, R.D. e outros; *Condição Regente no Projeto das Linhas de Transmissão*; Revista Mundo Elétrico, São Paulo, 1983.
- 16) GERE, J.M. and WEAVER, W.; *Matrix Analysis of Framed Structures*; Von Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- 17) GONTIJO, C.R. e outros; *Nova Concepção para Projetos de Linhas de Transmissão com Base na Otimização de Torres e Fundações*; 9º SNPTEE, Belo Horizonte, 1987.
- 18) JAYARAMAN, H.B. and KNUDSON, W.C.; *A Curved Element For the Analysis of Cable Structures*; Computers and Structures, vol. 14, nº 3-4, pp 325-333, Great Britain, 1981.
- 19) MONTEIRO, L.C.G. e FRANCO, F.L.; *Locação de Torres por Computador*; 4º SNPTEE, Rio de Janeiro, 1977.
- 20) MUKHANOV, K.; *Estruturas Metálicas*; Editora Mir, Moscou, 1980.
- 21) NB-599; *Forças Devidas ao Vento em Edificações*; ABNT, Rio de Janeiro, 1990.
- 22) PEYROT, A.H. and GOULOIS, A.M.; *Analysis of Flexible Transmission Lines*; Journal of the Structural Division, ASCE, Chattanooga, Tennessee, 1978.
- 23) PEYROT, A.H. and GOULOIS, A.M.; *Analysis of Cable Structures*; Computers and Structures, Vol. 10, pp. 805-813, Great Britain, 1979.
- 24) PEYROT, A.H. and others; *Application of Cable Elements Concept to a Transmission Line With Cross Rope Suspension Structures*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, USA, 1981.
- 25) RACHID, M.; *Instabilidade de Barras de Seção Delgada*; USP-EESC, Publicação 062/83, São Carlos, 1983.

- 26) SAE – Societa Anonima Eletrificazione S.P.A.; *Cold-Formed Technology for Power Transmission Lines*; Catálogo, SAE, Milano, 1987.
- 27) SANTOS, M.L.W.; Estudos de Correlação de Temperatura e Velocidade do Vento Para Projeto e Verificação de Linhas de Transmissão; Trabalho nº 22-89(GT-08)08, CIGRE/Brasil, CPGEC-UFRGS, Porto Alegre, 1988.
- 28) SBE – Sociedade Brasileira de Eletrificação S.A.; *Manual do Programa ELDA*; SBE, Belo Horizonte, 1980.
- 29) SILVA, P.R.R.L.; *Especificações Técnicas Para Projeto e Fabricação de Estruturas Metálicas Treliçadas para Linhas de Transmissão*; Trabalho N°22-89(GT-08)19, CIGRE/Brasil, Riode Janeiro, 1989.
- 30) SILVA, P.R.R.L.; *Resumo Comparativo de Diversas Especificações Técnicas para Projeto e Fabricação de Estruturas Metálicas Treliçadas para Linhas de Transmissão*; Trabalho N° 22-89(GT-08)18, CIGRE/Brasil, Rio de Janeiro, 1989.
- 31) SILVA, J.B.G.F. e outros; *Mechanical Properties of Steel Used in Brazilian Angles*; Trabalho N° 22-88(GT-08)25, CIGRE/Brasil, Rio de Janeiro, 1988.
- 32) SILVA, J.B.G.F. e SILVA, P.R.R.L.; *Cálculo de Torres para Linhas de Transmissão*; Apostilha, DEE-UFMG, Belo Horizonte, 1991.
- 33) SILVA, J.B.G.F. e outros; *Utilização de Estruturas com Perfis de Chapa Dobrada*; 3º ERLAC, CIGRE/Brasil, Foz do Iguaçu, 1989.
- 34) VASCONCELLOS FILHO, A. ; *Teoria das Estruturas*; Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte, 1986.
- 35) WEAVER, W.; *Computer Programs for Structural Analysis*; D. Van Nostrand Company Inc., New Jersey, 1967.
- 36) ZAGO, P.; *Cold-Forming, a Development in the Lattice Transmission Tower Design*; Trabalho N° 22-90(GT-08)09, CIGRE/Brasil, Rio de Janeiro, 1990.
- 37) ZAVELANI, A. and FAGGIANO,P.; *Design of Cold-Formed Latticed Transmission Towers*; ASCE Spring Convention, Atlanta, Ga, May 1984.
- 38) ZIENKIEWICZ, O.C. ; *The Finite Element Method*; MacGraw-Hill Book Company Limited, Berkshire, England, 1977.

Apêndice A											
Arquivos de Entrada de Dados e											
Saída de Resultados do Primeiro Exemplo											

O objetivo deste Apêndice é mostrar os dados de entrada e a saída de resultados do exemplo 1 apresentado no Capítulo 8.

Na Tabela número 1 são apresentados os dados relativos à geometria da estrutura, às propriedades do material, às propriedades geométricas das seções transversais das barras e aos carregamentos.

Tabela 1
Dados de Entrada para o Cálculo da Estrutura

\$\$\$TPGEOM											
TI TORRE TIPO SSA						00010					
ESATORRE SSA COM EXTENSAO 0.0 M						AC*		2CB			
ESBTORRE SSA COM EXTENSAO 0.0 M						ADF*		2FE			
COORDENADAS DOS NÓS DA FAMÍLIA DE TORRES											
CO	6	0	-33000	-98000	2						
CO	1	0	0	-90000	0						
CO	8	6000	-6000	0	4						
CO	2	6000	-6000	-78000	4						
CO	12			-65000	4	2	8				
CO	16			-52000	4	2	8				
CO	20			-39000	4	2	8				
CO	24			-26000	4	2	8				
CO	28			-13000	4	2	8				
CO	32			-71500	4	2	8				
CO	36				2	2	4			1	2
CO	38			-58500	4	2	8				
CO	42				2	16	18			1	2
CO	44			-45500	4	2	8				

CO	48				2	20	22		1	2
CO	50		-32500		4	2	8			
CO	54		-19500		4	2	8			
CO	58				2	28	30		1	2
CO	60		-6500		4	2	8			
CO	64				2	8	10		1	2
CO	66	0	-33000	-78000	2					
CO	68	0	-27500	-80000	2					
CO	70	0	-33000	-39000	2					
CO	72	0	-28846	-41000	2					
CO	74	0	-33000	0	2					
CO	76	0	-28846	-2000	2					
CO	112				1	8	9		1	2
CO	82		8000		4	8	F 1			
CO	86		23000		4	8	F 1			
CO	90		40000		4	8	F 1			
CO	94		58000		4	8	F 1			
CO	98		77000		4	8	F 1			
CO	102		98000		4	8	F 1			
CO	136		120000		4	8	F 1			
COA	1				1	136	137		1	2
COA	3				2	136	138		1	2
COB	1		135000		8	1	4	8	F 1	
COC	1		180000		8	1	4	8	F 1	
COD	1		144000		4			8	F 1	
COD	5		168000		4			8	F 1	
COD	9				1	D	5D 6		1	2
COD	11				2	D	5D 7		1	2
COD	13		180000		8	4		8	F 1	
COD	17		180000		8	4		8	F 1 A 1	
COD	21		180000		8	4		8	F 1 A 3	
COE	1		195000		8	1	4	8	F 1	
COF	1	26000	-26000	24000	1	4				

MATERIAL E PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

MA	11	2100000
PR	1	1
PR	2	232
PR	3	272
PR	4	401
PR	5	461
PR	6	582
PR	7	929
PR	8	1148

BARRAS DAS ESTRUTURAS

BA C 1	2	1 11 1 5
BA C 2	6	1 27 1 5
BA C 3	2	6 61 6
BA C 4	2	5 15 1 2
BA T 1T	2	13 81 2
BA T 1T	12	17 81 2
BA T 2T	16	21 81 2
BA T 3T	20	25 81 2
BA T 3T	24	29 81 2
BA T 4T	28	9 81 2
BA T 1L	32	36 61 2
BA T 1L	32	40 91 2
BA T 1L	38	42 61 2
BA T 1L	44	42 61 2
BA T 1L	44	48 61 2
BA T 2L	50	48 61 2
BA T 2L	50	56 91 2
BA T 2L	54	58 61 2
BA T 2L	60	58 61 2
BA T 2L	60	64 61 2
BA F 1	2	32 51 5
BA F 1	32	12 51 5
BA F 1	12	38 51 5
BA F 1	38	16 51 5
BA F 1	16	44 51 5
BA F 1	44	20 51 5
BA F 1	20	50 51 5
BA F 1	50	24 51 5
BA F 1	24	54 51 5
BA F 2	54	28 51 6
BA F 2	28	60 51 6
BA F 2	60	8 51 6
BA 1T	32	13 81 1
BA 2T	38	13 81 1
BA 3T	44	17 81 1
BA 4T	50	21 81 1
BA 5T	54	25 81 1
BA 6T	60	29 81 1
BA 7T	12	34 91 1
BA 8T	24	52 91 1
BA 1Q	2	37 01 1
BA 1Q	36	5 01 1

BA	2Q	16	43	01	1
BA	2Q	42	19	01	1
BA	3Q	20	49	01	1
BA	3Q	48	23	01	1
BA	4Q	28	59	01	1
BA	4Q	58	31	01	1
BA	5Q	112	6413	1	1
BA	5Q	112	113	01	1
BA M	1	2	66	61	5
BA M	2	68	127	1	5
BA	1M	66	68	21	5
BA	2M	2	68	61	1
BA M	1Q	2	310	1	3
BA M	2Q	2	36	61	2
BA M	11	20	70	61	5
BA M	12	16	72	61	2
BA	11M	70	72	21	5
BA	12M	20	72	61	1
BAM	11Q	16	1710	1	2
BAM	12Q	16	42	61	2
BAM	13Q	8	112	71	4
BAM	14Q	20	48	61	3
BAM	15Q	20	2315	1	3
BA M	11	8	74	61	5
BA M	12	28	76	61	2
BA	11M	74	76	21	5
BA	12M	8	76	61	1
BAM	11Q	28	2910	1	2
BAM	12Q	28	58	61	2
BAM	14Q	8	64	61	2
BAM	15Q	8	1115	1	2
BAM	13Q	8	910	1	4
BA T	5T	82	112	71	3
BA T	5L	82	64	61	3
BA T	6T	82	87	81	3
BA T	6L	82	88	91	3
BA T	7T	86	91	81	3
BA T	7L	86	92	91	3
BA T	8T	90	95	81	2
BA T	8L	90	96	91	2
BA T	9T	94	99	81	2
BA T	9L	94	100	91	2
BA T	10T	98	103	81	2

BA T 10L 98 104 91 2
BA T 11T 102 137 81 2
BA T 11L 102 138 91 2
BA F 3 8 82 51 7
BA F 3 82 86 51 7
BA F 3 86 90 51 7
BA F 3 90 94 51 7
BA F 4 94 98 51 7
BA F 4 98 102 51 7
BA F 4 102 136 51 7
BA B 10 136 A 1 71 3
BA B 10 136 A 3 61 3
BA 11Q A 1 A 3 131 1
BA 12Q A 1 A 2 01 1
BA P 1 B 1 A 1 71 3
BA P 1 B 1 A 3 61 3
BA F 5 136 B 1 51 8
BA P 4 C 1 A 1 71 4
BA P 4 C 1 A 3 61 4
BA F 5 136 C 1 51 8
BA T 13 D 1 A 1 71 5
BA T 13 D 1 A 3 61 5
BA T 14 D 1 D 9 71 5
BA T 14 D 1 D 11 61 5
BA F 5 136 D 1 51 8
BA F 5 D 1 D 5 51 8
BA B 20 D 5 D 9 71 5
BA B 20 D 5 D 11 61 5
BA 21Q D 9 D 11 131 1
BA 22Q D 9 D 10 01 1
BA F 5 B D 5 D 13 51 8
BA B 24 D 13 D 17 51 2
BA B 24 D 13 D 21 51 2
BA 23Q D 17 D 21 51 1
BA 24Q D 17 D 11 61 1
BA 25Q D 21 D 9 71 1
BA B 21 D 5 D 17 51 2
BA B 21 D 5 D 21 51 2
BA B 22 D 17 D 9 71 5
BA B 22 D 21 D 11 61 5
BA P 1 E 1 D 17 51 3
BA P 1 E 1 D 21 51 3
BA F 5 D 13 E 1 51 8

BA P 4 F 1D17 51 4
 BA P 4 F 1D21 51 4
 BA F 5 D13 F 1 51 8

 CARREGAMENTOS ATUANTES

\$\$\$TPGCAR SNS

A 12 6
 A 32 66
 A 52 68
 A 72 70

 CARREGAMENTO BÁSICO

CO1	638	689	0	8628	3960	VENTO E PESO PRÓPRIO
B	6	7	0	150	100	
B	2	5	0	420	0	
B	20	23	0	510	600	
B	8	11	0	510	300	
B	90	93	0	528	600	
B	98	101	0	660	600	
B D 1	136	139	0	780	0	
B B 1	136	139	0	780	0	
B C 1	136	139	0	780	0	
B	B 1	B 4	0	120	0	
B	C 1	C 4	0	480	0	
B E 1 D 5	D 8		0	1020	880	
B F 1 D 5	D 8		0	1020	880	
B	E 1	E 4	0	270	0	
B	F 1	F 4	0	600	0	

 CARGAS TÍPICAS

TO1	0	360	290	0	0	0
TO2	0	720	550	0	0	0
TO3	0	55	290	1620	40	200
TO4	0	110	550	1630	75	395
TO5	0	0	970	0	0	0
TO6	0	0	1580	0	0	0

 HIPÓTESES DE CÁLCULO

H 1	0	01 01 02 02 02 02 02	01	0	1.00	1.15
H 1E	0	01 0 02 0 02 0 02 0	01	0	1.00	1.15
H 1D	0	0 01 0 02 0 02 0 02	01	0	1.00	1.15
H 2.1	0	03R 03 04 04 04 04 04	01	0	.1479	1.15
H 2.2	0	03 03R 04 04 04 04 04	01	0	.1479	1.15
H 2E1	0	03R 0 04 0 04 0 04 0	01	0	.1479	1.15
H 2D2	0	0 03R 0 04 0 04 0 04	01	0	.1479	1.15
H 3.1	0	03 03 04R 04 04 04 04	01	0	.1479	1.15

H 3.2	0	03	03	04	04R	04	04	04	04	01	0	.1479	1.15
H 3.3	0	03	03	04	04	04	04	04R	04	01	0	.1479	1.15
H 3.4	0	03	03	04	04	04	04	04	04R	01	0	.1479	1.15
H 3E1	0	03	0	04R	0	04	0	04	0	01	0	.1479	1.15
H 3D2	0	0	03	0	04R	0	04	0	04	01	0	.1479	1.15
H 3E3	0	03	0	04	0	04	0	04R	0	01	0	.1479	1.15
H 3D4	0	0	03	0	04	0	04	0	04R	01	0	.1479	1.15
H 4		05	05	06	06	06	06	06	06	01	0	0	1.15
H 4E		05	0	06	0	06	0	06	0	01	0	0	1.15
H 4D		0	05	0	06	0	06	0	06	01	0	0	1.15

Na Tabela número 2 é apresentado o resumo das forças solicitantes máximas nas barras obtidas pesquisando-se todos os carregamentos. Ela representa, portanto, a envoltória das forças máximas de tração e compressão.

BARRA	HIP.	COMPRESSÃO	HIP.	TRAÇÃO
C 1	4D	-4175.	4E	3531.
C 2	1ER	-562.	4E	2123.
C 3	2D2	-4951.	2E1	4560.
C 4	2.2	-1030.	2D2	896.
T 1T	2.2	-2143.	2.2	2143.
T 2T	2.2	-2414.	2E1	2424.
T 3T	2.2	-2311.	2.2	2311.
T 4T	2.1	-3009.	2D2	3115.
T 1L	3.2	-2198.	3.2	2198.
T 2L	3.2	-2271.	3.2	2271.
F 1	1	-10192.	1R	8987.
F 2	1	-13058.	1R	11817.
M 1	3.1	-4352.	3D2	3795.
M 2	1E	3.	4E	4623.
M 1Q	2.1	-2571.	3D2	1760.
M 2Q	3.1	-1522.	4D	2561.
M 11	3.4	-4216.	3.4	3795.
M 12	2.2	-16.	4	1871.
M 11Q	2E1	-803.	4	1864.
M 12Q	4	-431.	2.2	4.

Tabela 2
Resumo das Forças Máximas nas Barras

BARRA	HIP.	COMPRESSÃO	HIP.	TRAÇÃO
M 13Q	3D4	-2420.	3.4	2144.
M 14Q	3D4	-1825.	3.4	1755.
M 15Q	4	-1199.	3.4	1043.
T 5T	2D2	-2241.	2D2	2241.
T 5L	3.3	-2466.	3.3	2466.
T 6T	2D2	-1705.	2D2	1705.
T 6L	3.3	-1877.	3.3	1877.
T 7T	2D2	-1410.	2D2	1410.
T 7L	3.4	-1552.	3.3	1552.
T 8T	2D2	-1193.	2E1	1157.
T 8L	3.4	-1284.	3.3	1248.
T 9T	2E1	-966.	2D2	996.
T 9L	3.4	-1042.	3.4	1072.
T 10T	2E1	-905.	2D2	845.
T 10L	3.4	-942.	3.4	881.
T 11T	2E1	-722.	2D2	774.
T 11L	3.4	-754.	3.4	805.
F 3	1	-18280.	1R	16429.
F 4	1	-21547.	1R	19232.
B 10	1	-702.	1	663.
P 4	1D	-2316.	1E	2316.
F 5	1	-23554.	1R	21233.
P 1	1	-1433.	1R	1427.
T 13	1	-1134.	1	1134.
T 14	1	-907.	1	907.
B 20	1D	-371.	1E	371.
F 5B	1	-23554.	1R	21233.
B 24	1	2.	1R	2.
B 21	1R	-660.	1	662.
B 22	1E	-2273.	1E	2273.

Na Tabela número 3 é apresentado o resumo das cargas máximas F_z de tração e compressão, e respectivas componentes horizontais F_x e F_y , atuantes nas fundações.

Tabela 3
Resumo das Cargas nas Fundações
(Cargas Verticais)

Cargas Máximas FZ de Compressão					
HIP.	COMB.		FZ	FY	FX
1	B	6	-24388	3102	-2092

Cargas Máximas FZ de Tração					
HIP.	COMB.		FZ	FY	FX
1R	B	5	22074	2905	1895
1R	B	6	22206	2375	1886

Tabela 4
Deslocamentos dos Nós
(Deslocamentos dos Nós × 100) (Combinação 1)

NÓ		1	1E	1D	1R	1ER	1DR	2.1
6	DX	.000	.000	.000	.000	.000	.000	18.657
	DY	33.237	17.461	24.526	33.280	21.031	21.000	5.095
	DZ	-6.917	-2.982	-5.556	-7.170	-4.423	-4.379	-851
7	DX	.000	.000	.000	.000	.000	.000	7.136
	DY	33.337	17.488	24.614	33.294	21.014	21.045	5.183
	DZ	7.570	3.348	6.012	7.317	4.526	4.570	1.474
1	DX	.000	.000	.000	.000	.000	.000	11.625
	DY	31.507	16.704	23.143	31.507	19.924	19.924	4.851
	DZ	.228	.148	.149	.060	.060	.060	.224
8	DX	.015	.007	.010	.014	.009	.008	4.353
	DY	13.643	8.157	9.547	13.641	8.851	8.850	2.453
	DZ	-.688	-.336	-.505	-.806	-.484	-.484	.352
9	DX	-.013	-.006	-.011	-.014	-.008	-.009	3.577
	DY	13.639	8.153	9.546	13.641	8.850	8.851	2.450
	DZ	1.031	.569	.738	.912	.590	.590	.617
10	DX	-.015	-.007	-.010	-.014	-.009	-.008	4.347
	DY	13.643	8.157	9.547	13.641	8.851	8.850	1.682
	DZ	-.688	-.336	-.505	-.806	-.484	-.484	-.277
11	DX	.013	.006	.011	.014	.008	.009	3.580
	DY	13.639	8.153	9.546	13.641	8.850	8.851	1.678
	DZ	1.031	.569	.738	.912	.590	.590	-.016
2	DX	.002	.009	-.008	-.003	-.001	-.003	11.400
	DY	28.894	15.568	21.050	28.886	18.305	18.303	5.437
	DZ	-1.069	-.443	-.863	-1.234	-.741	-.739	.631
3	DX	.009	-.002	.012	.003	.003	.001	9.493
	DY	28.877	15.556	21.042	28.885	18.302	18.305	5.383

	DZ	1.519	.736	1.159	1.355	.860	.861	1.014
4	DX	-.002	-.009	.008	.003	.001	.003	11.392
	DY	28.894	15.568	21.050	28.886	18.305	18.303	3.445
	DZ	-1.069	-.443	-.863	-1.234	-.741	-.739	-.598
5	DX	-.009	.002	-.012	-.003	-.003	-.001	9.480
	DY	28.877	15.556	21.042	28.885	18.302	18.305	3.466
	DZ	1.519	.736	1.159	1.355	.860	.861	-.163
12	DX	-.042	-.020	-.030	-.046	-.027	-.027	10.025
	DY	26.042	14.244	18.849	26.048	.16.549	16.550	4.833
	DZ	-1.054	-.449	-.838	-1.215	-.729	-.728	.594

Na Tabela número 4 são apresentados os deslocamentos de alguns dos nós da parte superior da torre mais alta, a qual foi calculada com a maior extensão e com as quatro maiores pernas. Podemos notar que o deslocamento máximo ocorre no nó 7 e é da ordem de 1% da altura total da torre, que é de 33,80 m.

Finalmente, como podemos observar, o volume de dados de entrada é relativamente pequeno quando comparado ao volume de dados requerido em um programa comercial de uso genérico, conforme anteriormente comentado no texto.