

**ANÁLISE ESTÁTICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS
AUTOPORTANTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO**

KELLEN DE SOUZA SINGH

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE ESTÁTICA DE TORRES METÁLICAS
TRELIÇADAS AUTOPORTANTES PARA LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

ENG^a CIVIL KELLEN DE SOUZA SINGH

ORIENTADOR: JOSÉ LUIS VITAL DE BRITO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**
PUBLICAÇÃO: E.DM – 004 A/09

BRASÍLIA / DF: ABRIL DE 2009.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE ESTÁTICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS
AUTOPORTANTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO**

ENG^a CIVIL KELLEN DE SOUZA SINGH

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

JOSÉ LUIS VITAL DE BRITO, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)

ACIR MÉRCIO LOREDO SOUZA, Ph.D (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

ENG^o MARLOS JOSÉ RIBEIRO GUIMARÃES, D.Sc. (FURNAS – GO)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 de Abril de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA.

SINGH, KELLEN DE SOUZA

Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão [Distrito Federal] 2009.

xviii, 110 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. Torres Autoportantes | 2. Análise Estrutural |
| 3. Análise Estática | 4. Não Linearidade. |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

SINGH, K. de S. (2009). Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão, Publicação E.DM– 004 A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xviii, 110 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Kellen de Souza Singh.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão.

GRAU / ANO: Mestre em Estruturas e Construção Civil / 2009.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode se reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Kellen de Souza Singh

Rua Sindeaux Barbosa, nº316, Mecejana.

CEP: 69304-250 – Boa Vista/RR, Brasil.

DEDICATÓRIA

À minha mãe Arlene e aos meus irmãos,
Erasm Kennedy e Elaine, pelo apoio e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me abençoar e zelar nesta e em todas as caminhadas.

À minha mãe, Arlene de Souza Singh, pelo amor incondicional, apoio, companhia e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão, Erasmo Kennedy de Souza Singh, pelo amor, apoio e incentivo em todos os meus projetos.

À minha irmã, Elaine de Souza Singh, pelo apoio, amor e compreensão diante dos anos roubados do nosso convívio.

Aos meus padrinhos, Clodomir e Sueli, pelo amor e carinho dedicados à minha família.

Ao professor José Luís Vital de Brito pelos ensinamentos transmitidos e pela orientação neste trabalho.

Aos meus amigos, Fabrício Bueno e Mônica Bueno, pela “ajuda” nas listas de exercício, viagens e companhia em todos os momentos.

Ao meu amigo Markito (Marcos Daniel Oliveira) pela amizade e conversas cheias de humor.

Ao professor e amigo José da Silva Neres pelo apoio, amizade e por acreditar em mim.

Aos professores e amigos da Universidade Federal de Roraima: João Bosco Duarte, Gioconda Martínez, Cláudia Gurjão, Ednalva Duarte, Marli Vieira e Aldir Cavalcante, pela amizade e palavras de incentivo.

A todos os professores do mestrado pelos ensinamentos transmitidos durante o curso.

Ao Evandro Ribeiro pelas preciosas dicas.

A todos os meus amigos e amigas de Boa Vista que me apoiaram nestes dois anos.

À Fátima, Irene, Themis, André e Cida pela ajuda e amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

ANÁLISE ESTÁTICA DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS AUTOPORTANTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

RESUMO

Este trabalho descreve o estudo do comportamento de torres metálicas autoportantes submetidas à ação do vento. Inicialmente foram modificadas algumas sub-rotinas dos programas desenvolvidos por Menin (2002). Assim, foram desenvolvidos novos programas: GTAU que gera a geometria das torres autoportantes e AETAU que realiza a análise estática. Nesses programas, a determinação da força estática do vento é determinada a partir dos critérios da NBR 6123 e NBR 5422.

As torres foram modeladas utilizando um modelo matemático não linear que permite alongamentos nos elementos de cabos e treliças para a introdução das forças de pré-tensionamento, além de considerar o efeito da variação da temperatura.

Completando o estudo, é realizada uma análise comparativa entre os resultados dos deslocamentos dos cabos, obtidos no programa AETAU, com a flecha obtida através da equação da parábola. Além disso, foram comparados os resultados da força axial (tração) dos cabos, obtidos no programa AETAU, com os resultados obtidos com o programa SAP2000 *Advanced* v. 12.0.0.

Os dados obtidos através da análise estática revelaram que os programas desenvolvidos foram capazes de simular o comportamento dos cabos quando submetidos à ação do vento e peso próprio.

Observando-se os resultados da análise sem vento de todos os modelos analisados, verificou-se que os maiores esforços de tração foram obtidos nas horizontais do tronco da cabeça, nas diagonais das mísulas e pára-raios e nos travamentos da extensão. Já os maiores esforços de compressão atuam nos montantes de toda a estrutura. Na análise com vento, os maiores esforços de tração foram obtidos nas diagonais das mísulas e pára-raios, nas diagonais da extensão e nos montantes das pernas. Para os esforços de compressão, os maiores valores encontrados foram nos montantes de toda a estrutura, nas diagonais do tronco e nos travamentos da extensão.

STATIC ANALYSIS OF SELF-SUPPORTING LATTICED STEEL TOWERS FOR TRANSMISSION LINES

ABSTRACT

This work describes the study of the behaviour of steel towers under the action of wind. Initially some sub-routines of the programs developed by Menin (2002) had been modified. Thus, new programs had been developed, according to this: GTAU that generates the geometry of the towers and AETAU which makes the static analysis. In these programs, the determination of the static forces of the wind is determined from the criteria of NBR 6123 and NBR 5422.

The towers were modeled using non-linear approach admitting stretching of cables and truss to describe the initial tension, and consider the effect of variation in temperature.

Completing the study, a comparison is made between the results of the displacements of the cables, obtained in the AETAU with the sag through the equation of the parabola. Furthermore, the results of axial force (tensile) of the cable, obtained in the AETAU were also compared with the results obtained with the program SAP2000 *Advanced* v.12.0.0.

The data obtained through the static analysis had showed that the developed programs had been capable to simulate the behaviour of the cables when submitted to the action of the wind and dead weight.

Observing the results of the analysis without wind of all the analyzed models, were verified that the biggest efforts of tensile had been gotten in the horizontal lines the head, in the diagonal lines of lightning rod and in the braces the extension. Already the biggest efforts of compression had been gotten in the legs of all the structure. In the analysis with wind, the biggest efforts of tensile had been gotten in the diagonal lines of lightning rod, in the diagonal lines of the extension and the vertical bars of the legs. For the compression efforts, the biggest joined values had been in the legs of all the structure, in the diagonal lines of the trunk and the braces of the extension.

ÍNDICE

| CAPÍTULO | PÁGINA |
|---|---------------|
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1– GENERALIDADES | 1 |
| 1.2 – MOTIVAÇÃO | 1 |
| 1.3 – OBJETIVOS | 2 |
| 1.4 – CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO | 2 |
| 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA | 10 |
| 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 10 |
| 3.2 – ESTRUTURAS OU SUPORTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO | 11 |
| 3.2.1 – Torres metálicas estaiadas | 12 |
| 3.2.2 – Torres metálicas autoportantes | 13 |
| 3.3 – CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO | 17 |
| 3.3.1 – Cabos de guarda ou pára-raios | 19 |
| 3.3.2 – Cabos condutores | 19 |
| 3.4 – HISTÓRICO DE ALGUNS ACIDENTES ENVOLVENDO LINHAS DE TRANSMISSÃO | 23 |
| 4 – ANÁLISE ESTÁTICA EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO | 26 |
| 4.1 – AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS SEGUNDO A NBR 6123 (FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES) | 26 |
| 4.2 – AÇÃO DO VENTO NOS CONDUTORES SEGUNDO A NBR 5422 (PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA) | 35 |
| 4.3 – DIMENSIONAMENTO DE PERFIS E CABOS | 38 |

| | |
|---|------------|
| 5 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA | 41 |
| 5.1 – MODELO NÃO LINEAR PARA CABO TENSIONADO | 41 |
| 5.1.1 – Deformação longitudinal | 41 |
| 5.1.2 – Energia potencial total | 45 |
| 5.1.3 – Gradiente da energia potencial total | 46 |
| 6 – PROGRAMAS COMPUTACIONAIS | 50 |
| 6.1 – PROGRAMA GTAU | 50 |
| 6.2 – PROGRAMA AETAU | 52 |
| 6.3 – PROGRAMA GTAUDEF | 56 |
| 7 – APLICAÇÕES NUMÉRICAS | 58 |
| 7.1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS | 58 |
| 7.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS | 63 |
| 8 – CONCLUSÕES | 80 |
| 8.1 – CONCLUSÕES FINAIS | 80 |
| 8.2 – SUGESTÕES | 81 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |
| APÊNDICES: | |
| A – ARQUIVO DO BANCO DE DADOS (PERFIS) | 87 |
| B – ARQUIVO DO BANCO DE DADOS (CABOS) | 88 |
| C – BITOLAS DOS PERFIS | 90 |
| D – BITOLAS, ESFORÇO AXIAL E ENCURTAMENTOS DOS CABOS | 93 |
| E – ESFORÇOS NOS PERFIS | 97 |
| F – REAÇÕES DE APOIO | 102 |

LISTA DE TABELAS

| TABELA | PÁGINA |
|---|---------------|
| Tabela 3.1 – Classificação das linhas de transmissão quanto ao nível de tensão (Gontijo,1994) | 10 |
| Tabela 7.1 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 350m. | 60 |
| Tabela 7.2 – Bitolas e comprimento do tensionamento dos cabos para vãos iguais de 350m. | 61 |
| Tabela 7.3 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos com vãos iguais. | 61 |
| Tabela 7.4 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos com vãos diferentes. | 61 |
| Tabela 7.5 – Parâmetros de vento conforme NBR 6123 e NBR 5422. | 62 |
| Tabela 7.6 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos iguais. | 64 |
| Tabela 7.7 – Tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos iguais. | 65 |
| Tabela 7.8 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos diferentes. | 66 |
| Tabela 7.9 – Tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos diferentes. | 67 |
| Tabela 7.10 – Comparação entre os deslocamentos e flechas dos cabos condutores (modelos numéricos com vãos iguais). | 69 |
| Tabela 7.11 – Comparação entre os deslocamentos e flechas dos cabos (modelos numéricos com vãos diferentes). | 70 |
| Tabela 7.12 – Esforços nos cabos obtidos pelo programa AETAU para vãos iguais de 350m. | 71 |
| Tabela 7.13 – Esforços nos cabos obtidos pelo programa AETAU para vãos diferentes de 260m e 310m. | 71 |
| Tabela 7.14 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 350m. | 72 |
| Tabela 7.15 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 260m e 310m. | 73 |
| Tabela 7.16 – Reações de apoio para vãos iguais de 350m. | 74 |
| Tabela 7.17 – Reações de apoio para vãos diferentes de 260m e 310m. | 75 |
| Tabela 7.18 – Comparações entre os esforços nos cabos do programa AETAU e SAP2000 para vãos iguais de 350m (análise sem vento). | 76 |
| Tabela 7.19 – Deslocamentos dos nós dos pára-raios e mísulas para vãos iguais de 350m. | 78 |

| | |
|---|----|
| Tabela A.1. – Banco de dados de perfis (Perfil.aco). | 87 |
| Tabela B.1.A – Banco de dados dos cabos (Cabo.aco). | 88 |
| Tabela B.1.B – Banco de dados dos cabos (Cabo.aco). | 89 |
| Tabela C.1 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 50m. | 90 |
| Tabela C.2 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 150m. | 90 |
| Tabela C.3 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 250m. | 90 |
| Tabela C.4 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 400m. | 91 |
| Tabela C.5 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 500m. | 91 |
| Tabela C.6 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 50m e 150m. | 91 |
| Tabela C.7 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 70m e 125m. | 91 |
| Tabela C.8 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 180m e 220m. | 92 |
| Tabela C.9 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 260m e 310m. | 92 |
| Tabela C.10 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 350m e 400m. | 92 |
| Tabela D.1 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos iguais de 50m. | 93 |
| Tabela D.2 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos iguais de 150m. | 93 |
| Tabela D.3 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos iguais de 250m. | 93 |
| Tabela D.4 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos iguais de 400m. | 94 |
| Tabela D.5 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos iguais de 500m. | 94 |
| Tabela D.6 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos diferentes de 50m e 150m. | 95 |
| Tabela D.7 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos diferentes de 70m e 125m. | 95 |
| Tabela D.8 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos diferentes de 180m e 220m. | 95 |
| Tabela D.9 – Esforço axial e pré-tensionamento dos cabos para vãos diferentes de 350m e 400m. | 96 |
| Tabela E.1 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 50m. | 97 |
| Tabela E.2 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 150m. | 98 |
| Tabela E.3 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 250m. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Tabela E.4 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 400m. | 99 |
| Tabela E.5 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 500m. | 99 |
| Tabela E.6 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 50m e 150m. | 100 |
| Tabela E.7 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 70m e 125m. | 100 |
| Tabela E.8 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 180m e 220m. | 101 |
| Tabela E.9 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 350m e 400m. | 101 |
| | |
| Tabela F.1 – Reações de apoio para vãos iguais de 50m. | 102 |
| Tabela F.2 – Reações de apoio para vãos iguais de 150m. | 103 |
| Tabela F.3 – Reações de apoio para vãos iguais de 250m. | 104 |
| Tabela F.4 – Reações de apoio para vãos iguais de 400m. | 105 |
| Tabela F.5 – Reações de apoio para vãos iguais de 500m. | 106 |
| Tabela F.6 – Reações de apoio para vãos diferentes de 50m e 150m. | 107 |
| Tabela F.7 – Reações de apoio para vãos diferentes de 70m e 125m. | 108 |
| Tabela F.8 – Reações de apoio para vãos diferentes de 180m e 220m. | 109 |
| Tabela F.9 – Reações de apoio para vãos diferentes de 350m e 400m. | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | PÁGINA |
|--|--------|
| Figura 3.1 – Principais elementos das linhas de transmissão (Labegalini <i>et al</i> , 1992). | 11 |
| Figura 3.2 – Classificação das torres quanto à forma de resistir aos carregamentos. | 12 |
| Figura 3.3 – Classificação das torres autoportantes quanto ao formato (Gontijo, 1994). | 13 |
| Figura 3.4 – Subestruturas de uma torre autoportante tipo tronco-piramidal. | 14 |
| Figura 3.5 – Elementos de barras do tronco da cabeça. | 15 |
| Figura 3.6 – Elementos de barras dos suportes dos pára-raios e mísulas. | 15 |
| Figura 3.7 – Elementos de barras do tronco básico inferior. | 16 |
| Figura 3.8 – Elementos de barras da extensão. | 16 |
| Figura 3.9 – Elementos de barras das pernas. | 16 |
| Figura 3.10 – <i>Sites</i> da cabeça. | 17 |
| Figura 3.11 – Cabo suspenso em dois suportes de mesma altura. | 18 |
| Figura 3.12 - Nomenclatura empregada na fabricação de cabos de aço (Pasquetti, 2003). | 21 |
| Figura 3.13 – Formação dos cabos CAA ou ACSR. | 22 |
| Figura 3.14 – Exemplo de acidentes com torres de linhas de transmissão. | 24 |
| | |
| Figura 4.1 –Isopletras da velocidade básica V_0 (m/s) (NBR 6123). | 27 |
| Figura 4.2 – Forças aerodinâmicas (Blessmann, 1990). | 28 |
| Figura 4.3 – Perfil contínuo (Blessmann, 1990). | 29 |
| Figura 4.4 – Decomposição vertical para as forças de arrasto (Guimarães, 2000). | 33 |
| Figura 4.5 – Decomposição horizontal da força de arrasto. | 35 |
| Figura 4.6 – Fator de efetividade α (NBR 5422). | 37 |
| Figura 4.7 – Efeito da pressão do vento sobre os condutores (Labegalini <i>et al</i> , 1992). | 37 |
| | |
| Figura 5.1 – Modelo não linear de elemento de cabo no espaço e sua representação vetorial (Menin, 2002). | 42 |
| Figura 5.2 – Deslocamentos de um elemento de cabo no espaço (Menin, 2002). | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.1 – Fluxograma do programa GTAU. | 52 |
| Figura 6.2 – Fluxograma do programa AETAU. | 56 |
| Figura 6.3 – Fluxograma do programa GTAUDEF. | 57 |
| Figura 7.1 – Trecho de uma linha de transmissão com três torres autoportantes e dois vãos. | 59 |
| Figura 7.2 – Torre autoportante tipo tronco-piramidal (medidas em cm e sem escala). | 60 |
| Figura 7.3 – Eixos ortogonais (x, y e z). | 63 |
| Figura 7.4 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos iguais. | 64 |
| Figura 7.5 – Análise comparativa do tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos iguais. | 65 |
| Figura 7.6 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos diferentes. | 66 |
| Figura 7.7 – Análise comparativa do tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos diferentes. | 67 |
| Figura 7.8 – Posição dos cabos (pára-raios e condutores) na torre. | 68 |
| Figura 7.9 – Configuração indeformada e deformada da torre e dos cabos. | 77 |
| Figura 7.10 – Configuração deformada do cabo (análise com vento). | 77 |
| Figura 7.11 – Localização dos nós dos pára-raios e mísulas do topo da estrutura. | 78 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|---|
| A | : Área frontal da superfície limitada pelo contorno. |
| A_e | : Área frontal efetiva. |
| A_g | : Área bruta da seção transversal dos perfis estruturais. |
| A_n | : Área líquida da seção transversal dos perfis estruturais. |
| b, F_r, p | : Parâmetros meteorológicos conforme NBR 6123. |
| c | : Vetor que representa o tensionamento do elemento de cabo. |
| C_a | : Coeficiente de arrasto. |
| C_c | : Índice de esbeltez limite entre flambagem elástica e inelástica - AISC. |
| C_{xc} | : Coeficiente de arrasto dos cabos (igual a 1.0). |
| $\cos \eta$ | : Cosseno diretor do elemento de cabo associado à direção X. |
| $\cos \gamma$ | : Cosseno diretor do elemento de cabo associado à direção Y. |
| $\cos \xi$ | : Cosseno diretor do elemento de cabo associado à direção Z. |
| d | : Diâmetro do cabo. |
| E | : Módulo de elasticidade do material. |
| f | : Vetor das forças nodais externas – análise estática. |
| F_a | : Força de Arrasto. |
| F_{a_i} | : Força de arrasto na extremidade inferior do módulo. |
| F_{a_s} | : Força de arrasto na extremidade superior do módulo. |
| F_{adm} | : Força admissível à compressão nos perfis estruturais. |
| F_{adm}^{t1} | : Força admissível à tração – ruptura da seção líquida. |
| F_{adm}^{t2} | : Força admissível à tração – escoamento da seção bruta. |
| F_c | : Força nos condutores decorrente da ação do vento. |
| F_g | : Força global do vento. |
| F_i | : Força no topo de um módulo i . |
| F_l | : Força lateral do vento |
| F_u | : Tensão última do material. |
| F_y | : Tensão de escoamento do material. |
| $g(x)$ | : Vetor gradiente da energia potencial total do sistema. |
| h_a | : Altura de aplicação da força de arrasto. |

| | |
|------------|--|
| K | : Parâmetro utilizado no cálculo do comprimento de flambagem. |
| K_1, K_2 | : Parâmetros do perfil contínuo de vento. |
| l | : Vetor que representa o comprimento inicial do elemento de cabo. |
| l' | : Vetor que representa a configuração deformada do elemento de cabo. |
| L_t | : Comprimento do elemento de cabo com efeito térmico. |
| $l_1(z)$ | : Largura da edificação na cota z . |
| Ma_i | : Momento de tombamento para a altura h_i . |
| M_k | : Momento de tombamento produzido pela força de arrasto de cada módulo k . |
| ndf | : Número de graus de liberdade total da estrutura. |
| p | : Vetor que representa os deslocamentos nodais da extremidade inicial do cabo. |
| p_r | : Peso virtual do cabo. |
| q | : Pressão dinâmica. |
| $q(z)$ | : variação da pressão dinâmica do vento ao longo da altura da estrutura. |
| r | : raio de giração do perfil estrutural. |
| r_{min} | : raio de giração mínimo do perfil estrutural. |
| S_1 | : Fator topográfico segundo NBR 6123. |
| S_2 | : Fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação. |
| S_3 | : Fator estatístico segundo NBR 6123. |
| u | : Vetor dos cossenos diretores do elemento de cabo na configuração indeformada. |
| V | : Volume do elemento de cabo ou treliça. |
| V_0 | : Velocidade básica do vento. |
| V_k | : Velocidade característica do vento. |
| x | : Vetor contendo os deslocamentos nodais do sistema. |
| Z | : Comprimento do vão considerado. |
| z | : Vetor auxiliar para o cálculo da deformação no elemento de cabo. |
| α | : Coeficiente de dilatação térmica. |
| α_c | : Área da seção transversal do elemento de cabo. |
| δ | : Vetor utilizado no cálculo da deformação no elemento de cabo. |

| | |
|-----------------------|--|
| ε | : Deformação longitudinal do elemento de cabo. |
| θ | : Ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vento. |
| ϕ | : Índice de área exposta. |
| γ_t | : Efeito térmico ($\gamma_t = \alpha \cdot \Delta T$). |
| λ | : Índice de esbeltez dos perfis. |
| λ_c | : Vetor que representa a distância entre nós na configuração indeformada do cabo tensionado. |
| λ_t | : Vetor que representa a configuração indeformada do cabo com efeito térmico. |
| μ | : Módulo do vetor c . |
| μ_t | : Módulo do vetor $\gamma_t \cdot l$. |
| π | : Energia de deformação do elemento de cabo ou treliça. |
| ρ | : Massa específica do ar. |
| $\sigma(\varepsilon)$ | : Tensão no elemento de cabo. |
| ΔL | : Variação real do comprimento do elemento no modelo linear de cabo. |
| ΔT | : Variação de Temperatura. |
| Π_0 | : Energia potencial inicial do sistema. |
| $\Pi(x)$ | : Energia potencial total do sistema. |
| $\ \quad \ $ | : Denota norma do vetor. |
| ∇ | : Denota a primeira derivada em relação aos deslocamentos nodais. |
| $(\quad)'$ | : Denota a primeira derivada em relação aos deslocamentos nodais, assim como ∇ . |
| $(\quad)''$ | : Denota segunda derivada em relação aos deslocamentos nodais. |
| $(\quad)^T$ | : Denota a transposta do vetor. |

LISTA DE ABREVIACOES

| Abreviação | Significado |
|-------------------|--|
| AAC | : All Aluminum Conductor. |
| ACSR | : Aluminum Conductor Steel Reinforced. |
| AETAU | : Análise Estática de Torres Autoportantes. |
| CA | : Cabos de alumínio. |
| CAA | : Cabos de alumínio com alma de aço. |
| CM | : Circular mil. |
| D | : Barras diagonais na face da torre. |
| EHS | : Extra High Strength. |
| GTAU | : Gerador de Torres Autoportantes. |
| GTAUDEF | : Gerador de Torres Autoportantes Deformada. |
| H | : Barras horizontais na face da torre. |
| M | : Barras dos montantes da torre. |
| NCE | : Número de elementos da discretização dos cabos da estrutura. |
| NN | : Número de nós da estrutura. |
| NTE | : Número de elementos de treliça da estrutura. |
| SAP | : Structural Analysis Program. |
| T | : Barras dos travamentos internos e externos da torre. |

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – GENERALIDADES

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas pelo homem. Para sua transmissão é necessário o emprego de torres que sustentam os cabos transmissores mantendo-os a uma distância segura do solo, interligando as unidades geradoras aos centros consumidores.

As linhas de transmissão de energia elétrica atravessam lugares nem sempre de fácil acesso surgindo a necessidade de transpor alguns obstáculos, como vales, rios e montanhas, levando à utilização de torres cada vez mais esbeltas.

Devido ao baixo peso próprio das torres metálicas treliçadas e à rara ocorrência de terremotos no Brasil, as principais forças consideradas em projetos são devidas à ação do vento. Neste trabalho será feita uma análise destas forças utilizando programas computacionais que levarão em consideração as recomendações das normas NBR 6123 (Forças devidas ao vento em edificações) e NBR 5422 (Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica).

1.2 – MOTIVAÇÃO

A motivação para estudar o efeito das ações do vento nas torres metálicas treliçadas utilizadas em linhas de transmissão são os inúmeros acidentes que causam prejuízos para as companhias de energia elétrica e interrupções de fornecimento à população.

A utilização de programas computacionais permite que se efetue uma gama maior de estudos com mais velocidade e precisão, o que pode colaborar com melhores análises e projetos, minimizando os riscos de incidentes e acidentes.

Além disso, os programas computacionais apresentam a vantagem da rápida obtenção dos resultados quando comparados com outros métodos. Existe também a necessidade de

desenvolver programas para cálculo e análise de torres metálicas de linhas de transmissão que levem em conta a não linearidade da estrutura.

1.3 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de programas computacionais, em linguagem Pascal, destinados a analisar o comportamento de torres metálicas autoportantes sob a ação do carregamento do vento, considerando este carregamento como estático.

Nos programas desenvolvidos foram estudados modelos numéricos compostos por uma torre autoportante tipo tronco-piramidal e por cabos, pára-raios e condutores; sendo assim, o carregamento do vento foi analisado da seguinte forma:

- Para as torres foram considerados os critérios propostos pela NBR 6123 (Forças devidas ao vento em edificações);
- Para os cabos, pára-raios e condutores, foram considerados os critérios propostos pela NBR 5422 (Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica).

Posteriormente, com o objetivo de verificar a eficiência dos programas desenvolvidos, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados dos deslocamentos dos cabos, obtidos no programa AETAU, com a flecha obtida através da equação da parábola (ver equação 3.5). Além disso, foram comparados os resultados dos esforços nos cabos, obtidos no programa AETAU, com os resultados obtidos com o programa de análise estrutural SAP2000 *Advanced* v. 12.0.0.

1.4 – CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por oito capítulos, sendo o primeiro de introdução e apresentação dos objetivos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, destacando alguns estudos sobre a ação do vento em torres metálicas treliçadas e suas respectivas conclusões.

No capítulo 3 são apresentadas informações sobre as torres e os condutores utilizados em linhas de transmissão, além disso, foram relatados alguns acidentes com torres metálicas treliçadas ocorridos no Brasil.

No capítulo 4 é descrita a ação do vento em estruturas treliçadas segundo a NBR 6123 (Forças devidas ao vento em edificações) e a ação do vento nos condutores segundo a NBR 5422 (Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica), além do critério utilizado no dimensionamento dos perfis e cabos.

Os programas computacionais desenvolvidos neste trabalho e as principais diferenças entre esses programas e os programas desenvolvidos por Menin são apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 é apresentado o modelo não linear de cabo tensionado utilizado na análise estática da estrutura (torre e cabos).

Os exemplos numéricos estudados são descritos no Capítulo 7, sendo acompanhados por explicações e gráficos comparativos dos resultados, indicando as semelhanças ou diferenças observadas.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros. No final do trabalho existem ainda vários apêndices, apresentados na forma de tabelas, contendo as informações necessárias para a realização das análises, bem como mostrando os principais resultados das análises efetuadas.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentaremos alguns estudos e conclusões de trabalhos relacionados a torres metálicas treliçadas utilizadas em linhas de transmissão e no sistema de telecomunicações.

Bayar (1986) realizou alguns ensaios no túnel de vento com modelos reduzidos de uma torre treliçada autoportante de seção quadrada. Os coeficientes de arrasto foram determinados para modelos compostos por cantoneiras simples e duplas, além disso, foi verificada a influência do ângulo de incidência do vento para torres situadas em morros através da inclinação do eixo vertical do modelo. Com este estudo, o autor propôs equações para determinação dos coeficientes de arrasto em função do índice de área exposta da estrutura.

Loredou Souza (1996) estudou o comportamento de linhas de transmissão de energia elétrica sob ação de ventos severos. Primeiramente, foram realizados ensaios no túnel de vento com o objetivo de analisar o efeito da escala de turbulência sobre a resposta de uma estrutura de cabos. Nos ensaios foram utilizados dois modelos de cabos, sendo um formado por apenas um cabo e o outro por dois cabos paralelos. Após o término da fase experimental, os resultados obtidos no túnel de vento foram comparados com um método estatístico baseado em linhas de influência. Posteriormente, foi realizada uma revisão do procedimento de projeto utilizado na determinação do carregamento do vento em torres de linha de transmissão. Além disso, processos correntes, como fator de rajada de Davenport, foram comparados com um método estatístico utilizando linhas de influência. O autor observou que há certas situações em que a resposta ressonante pode ser uma parcela significativa da resposta total.

Em sua tese de doutorado, Carril Jr. (2000) realizou investigações numéricas e experimentais em uma torre metálica treliçada para telecomunicações, com o objetivo de estudar o efeito dinâmico do vento neste tipo de estrutura. A torre foi dimensionada conforme as normas brasileiras e foram estudadas as respostas ressonantes e não ressonantes, além do fator de resposta de rajada. Na análise numérica foram comparados os modelos de DAVENPORT (1993), da norma brasileira NBR 6123/1988 e o processo do

vento sintético de FRANCO (1993). Alguns parâmetros foram analisados na parte experimental, tais como: ângulo de incidência do vento, índice de área exposta, efeito de proteção e o fator de interferência no coeficiente de arrasto de antenas de microondas, devido à proximidade da torre e a influência da turbulência do vento. Após o estudo, o autor concluiu que a resposta ressonante não é significativa para a estrutura utilizada como exemplo no trabalho, além disso, os valores dos parâmetros encontrados nos ensaios de laboratório são aceitáveis quando comparados com as diferentes normas existentes.

Em sua dissertação, Guimarães (2000) desenvolveu programas computacionais a fim de analisar estaticamente e dinamicamente torres metálicas autoportantes quadradas. Primeiramente, o autor realizou uma pesquisa de campo para identificar as características mais significativas das torres instaladas na região Centro-Oeste do Brasil, em seguida, analisou diversos projetos com o objetivo de avaliar os principais parâmetros utilizados em projetos. A análise dinâmica foi realizada segundo o método de simulação de Monte Carlo, cujos resultados foram comparados com os obtidos pelo programa comercial SAP2000. Com base nos resultados, concluiu-se que para o modelo de torre apresentada no trabalho, as deflexões, as ações de extremidades e as reações de apoio resultantes da análise estática são maiores quando comparadas com as da análise dinâmica.

Nascimento (2002) apresentou um estudo numérico dos procedimentos propostos pela NBR 6123/1988 para análise estática e dinâmica de estruturas treliçadas. Para isso, a autora escolheu duas torres utilizadas no sistema de telecomunicações, sendo uma com base quadrada e outra triangular. Os resultados obtidos na análise dinâmica, através do programa comercial SAP2000, mostraram que para um dimensionamento seguro deste tipo de estrutura é fundamental realizar a análise dinâmica. Além disso, os dois processos dinâmicos propostos pela norma brasileira apresentaram valores muito próximos, sendo o processo discreto o mais recomendado, pois permite trabalhar com mais de um modo de vibração da estrutura.

Pasquetti (2003) estudou a estabilidade estática e dinâmica de uma torre estaiada para telecomunicações utilizando o princípio da energia potencial mínima e o princípio de Hamilton. O autor deu ênfase aos estais que foram analisados conforme dois modelos, sendo que em um deles os cabos são resolvidos pela equação da catenária e o outro consiste em representar os cabos como molas com diversas leis constitutivas. Com base

nos resultados da análise estática, verificou-se que o colapso de um estai pode levar a configurações altamente instáveis e a grandes deslocamentos, além da mudança brusca da configuração de equilíbrio, o que pode provocar danos à estrutura. No que se refere à análise das vibrações livres e forçadas, observou-se que o sistema apresenta um comportamento não linear. Além disso, os parâmetros físicos e geométricos influenciam a frequência natural de uma forma similar a aquela observada na análise da carga crítica.

Machado (2003) analisou a resposta estrutural de uma torre metálica treliçada sob a ação do vento. A estrutura era utilizada como suporte de uma antena de rádio na cidade de Porto Alegre (RS) e colapsou em 2000 após um vendaval. O autor desenvolveu o estudo em duas etapas: uma teórica e outra experimental. Na etapa teórica, concluiu-se que os elementos verticais de suporte da torre (elementos montantes) estavam sub-dimensionados, pois a força de vento adotada para o projeto era bem menor do que a especificada em normas. Na parte experimental, utilizaram-se dois modelos (trechos) seccionais para análise das propriedades aerodinâmicas como coeficientes de arrasto, efeito de proteção, índice de área exposta e ângulo de incidência do vento levando a resultados satisfatórios.

Merce (2003) estudou o comportamento estático e dinâmico de torres metálicas autoportantes de seção quadrada através de programas desenvolvidos pela própria autora. A análise estática foi realizada segundo a NBR 6123/1988 e a análise dinâmica segundo os métodos de simulação de Monte Carlo e estatístico de Davenport. Primeiramente, a autora analisou estaticamente e dinamicamente uma torre de 40m, em seguida, as torres quadradas de 50, 70 e 90m utilizadas por Guimarães (2000) foram analisadas segundo o método de Davenport. Uma das conclusões obtidas neste estudo foi que os resultados da análise dinâmica, obtidos pelo método de Davenport, se aproximaram do método discreto proposto pela NBR 6123/1988. Além disso, para a torre de 40m, observou-se que os maiores deslocamentos de topo foram obtidos na análise estática.

Por intermédio de estudos experimentais, Klein (2004) analisou as características aerodinâmicas como efeito de proteção, coeficientes de força, índice de área exposta, influência do escoamento suave e turbulento, ângulo de incidência do vento sobre perfis tipo cantoneira e módulos triangulares e quadrados que compõem uma torre metálica treliçada. A autora concluiu que houve uma leve divergência dos coeficientes de força com a norma para alguns ângulos de incidência, percebeu que não ocorreram diferenças quanto

aos tipos de escoamentos, notou a importância do cálculo correto das áreas para a determinação da força atuante e comprovou o efeito de proteção, embora não tenha determinado o momento exato em que este efeito deixou de atuar na estrutura.

Rippel (2005) realizou, no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), medições das forças de vento sobre modelos reduzidos de módulos de duas torres metálicas treliçadas autoportantes. Estes módulos foram ensaiados para diferentes ângulos de incidência e níveis de velocidade do vento. Com este estudo, o autor comparou os coeficientes de arrasto obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente através de diversas normas existentes, além disso, verificou a eficácia das técnicas de medição de arrasto em túnel de vento para os modelos estudados, comparando as forças experimentais com as fornecidas pelos projetos das torres. Analisando os resultados, conclui-se que o somatório das forças de arrasto, considerando a estrutura dividida em vários módulos, apresenta valores próximos aos valores das forças atuantes sobre todo o conjunto. Também foi verificado que os valores dos coeficientes de arrasto fornecidos por normas são adequados apenas para alguns trechos das torres, não sendo indicados para os demais elementos cuja diferença entre a geometria real e da norma seja grande, como por exemplo, as mísulas, vigas e deltas da estrutura.

Oliveira (2006) estudou o comportamento estrutural de torres de linhas de transmissão de energia elétrica quando submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento. Para isto, o autor utilizou um modelo tridimensional constituído de elementos finitos de pórtico e treliça espacial que leva em consideração a interação cabo-estrutura. Desse modo, os grandes deslocamentos sofridos pelos cabos e isoladores são considerados na análise dinâmica dessa estrutura. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que as frequências naturais da torre isolada são muito maiores do que as do conjunto (torres e cabos). Além disso, os primeiros modos de vibração da torre são devidos aos elementos de cabos, sendo a variação da rigidez da torre praticamente irrelevante.

Em sua dissertação de mestrado, Ribeiro (2007) realizou um estudo numérico das ações estáticas e dinâmicas do vento em torres metálicas estaiadas de seção quadrada utilizadas no sistema de telecomunicações. O autor comparou os resultados dos exemplos numéricos obtidos pelos programas desenvolvidos por Menin (2002) com os do programa comercial

SAP2000, além disso, analisou o comportamento estático, dinâmico e modal de torres estaiadas considerando o rompimento de um cabo. Assim, concluiu que os programas desenvolvidos por Menin (2002) são capazes de simular satisfatoriamente os comportamentos estáticos, dinâmicos e modais deste tipo de estrutura, já que os dados obtidos nesses programas ficam bem próximos dos obtidos pelo SAP2000. Na análise das estruturas onde foi considerada a ruptura de cabos, observou-se que houve alterações nos valores do deslocamento máximo do topo da estrutura, além de modificações nas forças de pré-tensionamento inicial e nos esforços máximos de tração dos cabos.

Hatashita (2007) apresentou uma metodologia para análise de confiabilidade de torres de linhas de transmissão quando submetidas a ventos fortes. Seguindo as normas vigentes, realizou o dimensionamento de uma torre no programa SAP2000, cujos resultados serviram de dados de entrada para uma rotina no Matlab que calculava a confiabilidade de todas as barras através do método analítico FORM. O autor comparou os resultados do SAP2000 com os do Matlab e notou que a barra com menor índice de confiabilidade, também era a mais crítica no dimensionamento. Assim, manteve-se a coerência entre os resultados do dimensionamento com os da análise de confiabilidade. Além disso, foi apresentado um mapeamento das velocidades de vento do estado do Paraná.

Guimarães (2008) analisou a influência de determinados parâmetros na resposta estática e dinâmica de torres estaiadas de diferentes alturas. As solicitações na estrutura devidas ao vento foram obtidas através do programa Matlab e para a modelagem tridimensional em elementos finitos foram elaboradas rotinas na linguagem APDLs (ANSYS Parametric Design Language). Alguns parâmetros de projeto foram analisados tais como: quantidade, posicionamento e ângulo de inclinação dos estais, em termos de tensões de Von Mises, esforços nos estais e deslocamentos resultantes. O autor concluiu que o ângulo de inclinação dos estais com relação ao mastro pode ser reduzido, levando a uma redução da área ocupada pela estrutura, além disso, observou que as torres se mostraram mais sensíveis a deslocamentos do que às tensões.

3 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um sistema elétrico engloba três fases: produção da energia, transmissão e distribuição da energia aos consumidores finais. Devido ao grande potencial hidráulico do Brasil e a eficiência da conversão, a forma de produção de energia mais empregada é a gerada por hidrelétricas.

A transmissão da energia elétrica para os centros consumidores é feita através de linhas de transmissão. No Brasil, a primeira linha de que se tem registro, foi construída por volta de 1883, na cidade de Diamantina (Minas Gerais). A linha tinha 2 km e, na época, era a linha mais longa do mundo.

Com o crescimento da demanda da energia elétrica ocorreu a padronização das tensões das linhas. Assim, foram classificadas em três categorias, conforme tabela a seguir:

Tabela 3.1 – Classificação das linhas de transmissão quanto ao nível de tensão (Gontijo,1994).

| Nível de tensão | Categoria |
|------------------------|-------------------------|
| ≤ 230 kV | AT = Alta Tensão |
| Entre 230 kV e 700 kV | EAT = Extra Alta Tensão |
| > 700 kV | UAT = Ultra Alta Tensão |

Um sistema de transmissão de energia elétrica é composto de vários elementos como cabos, estruturas ou suportes, fundações, isoladores, ferragens e acessórios, conforme mostra a figura 3.1. Neste capítulo serão apresentadas algumas características dos suportes ou estruturas e dos cabos.

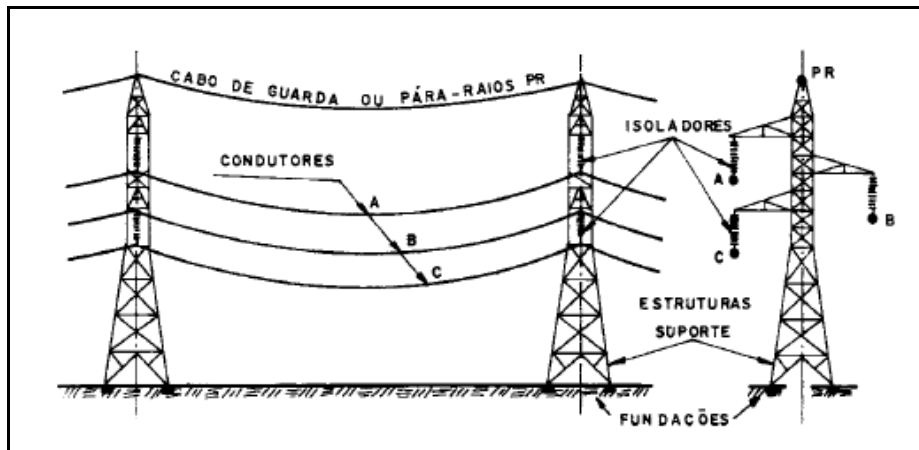


Figura 3.1 – Principais elementos das linhas de transmissão (Labegalini *et al*, 1992).

3.2 – ESTRUTURAS OU SUPORTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

As estruturas de uma linha de transmissão servem de suporte para os cabos condutores e pára-raios, além de suportarem mecanicamente os esforços transmitidos pelos mesmos. São utilizadas estruturas em concreto, metálicas com perfis de aço galvanizado ou postes de aço.

Para altas tensões, o emprego de torres metálicas treliçadas é a solução mais econômica, devido à rapidez na montagem, com menor mobilização de material e equipamentos na execução.

As estruturas podem ser classificadas, quanto à função que desempenham na linha, em:

- **Estrutura de suspensão:** são as mais comuns, inclusive por serem as mais simples e as mais econômicas. Sua finalidade é apoiar os cabos condutores e pára-raios, mantendo-os afastados do solo/terra e entre si, de acordo com normas de segurança. Apresentam como característica, o fato de que os condutores nelas têm continuidade, não sendo seccionados mecanicamente e sim apenas grampeados, através dos chamados grampos de suspensão.
- **Estrutura de amarração ou ancoragem:** ao contrário das estruturas de suspensão, elas seccionam mecanicamente as linhas de transmissão, servindo de ponto de reforço e abertura eventual em eventos específicos. Normalmente são projetadas

para resistirem às cargas assimétricas acidentais ou não, ou seja, são suportes de segurança.

- **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:** são destinadas a facilitarem a execução das transposições nas linhas de transmissão.

Segundo a forma de resistir aos carregamentos, as estruturas podem ser estaiadas ou autoportantes, conforme mostra a figura 3.2.

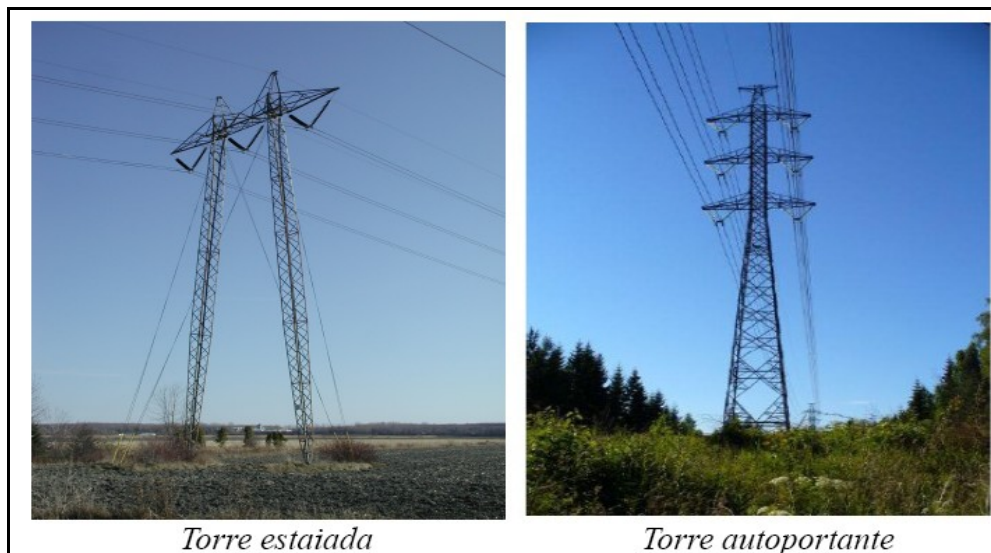


Figura 3.2 – Classificação das torres quanto à forma de resistir aos carregamentos.

3.2.1 – TORRES METÁLICAS ESTAIADAS

Nas estruturas estaiadas, os esforços horizontais transversais e longitudinais são absorvidos pelos tirantes ou estais, conseqüentemente, as componentes das resultantes horizontais são transmitidas ao solo. A desvantagem deste tipo de estrutura é a necessidade de áreas maiores para a faixa de servidão dos estais; além disso, a sua instalação deve ser em terrenos com topografia regular.

3.2.2 – TORRES METÁLICAS AUTOPORTANTES

Nas estruturas autoportantes, os esforços são transmitidos ao solo através de suas fundações. Segundo Labegalini *et al* (1992), podem ser de três tipos:

- **Rígidas:** são aquelas que, mesmo sob a ação das maiores solicitações, não apresentam deformações elásticas perceptíveis em qualquer direção.
- **Flexíveis:** são aquelas que, sob a ação das solicitações de maior intensidade, apresentam deformações sensíveis, que, por serem elásticas, desaparecem ao cessar a solicitação. São típicos deste tipo de suportes, os postes e pórticos articulados, independentemente do material com que são confeccionados.
- **Suportes mistos ou semi-rígidos:** são estruturas que apresentam rigidez em uma das direções principais, como por exemplo, os pórticos contraventados.

Quanto ao formato, as torres autoportantes mais empregadas em linhas de transmissão são: tronco-piramidal (a), delta (b) e delta “cara de gato” (c), conforme mostra a figura 3.3.

A escolha do tipo de torre a ser utilizada em uma linha de transmissão depende de vários fatores, entre eles: espaçamento máximo e mínimo entre fases, configuração dos isoladores, flecha dos condutores, número de circuitos, altura de segurança, etc.

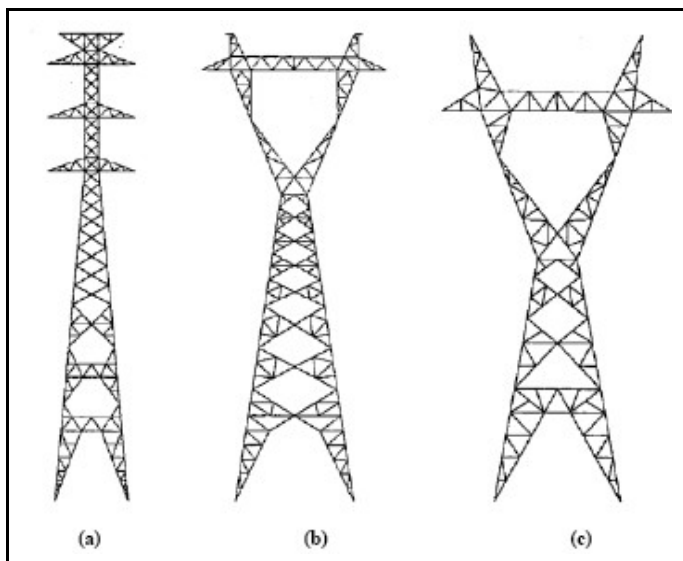


Figura 3.3 – Classificação das torres autoportantes quanto ao formato (Gontijo, 1994).

Neste trabalho, concentra-se o estudo nas torres metálicas autoportantes do tipo tronco-piramidal utilizadas como estrutura de suspensão em uma linha de transmissão de 138 kV. Este tipo de torre pode ser dividida em duas partes: cabeça e tronco inferior. Estas partes, por sua vez, são divididas em subestruturas, conforme mostra a figura 3.4. As subestruturas da cabeça são os suportes dos cabos pára-raios, as mísulas e o tronco da cabeça. O tronco inferior é composto pelas seguintes subestruturas: tronco básico inferior, a extensão do corpo básico e as pernas.

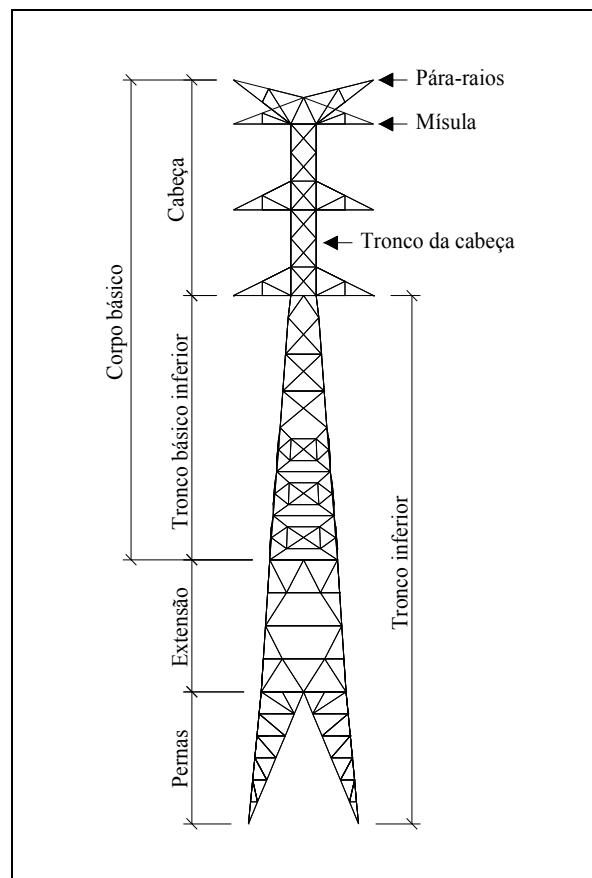


Figura 3.4 – Subestruturas de uma torre autoportante tipo tronco-piramidal.

Neste tipo de estrutura metálica, os perfis mais utilizados são as cantoneiras simples com abas iguais de aço ASTM A36, conhecido comercialmente no Brasil como MR250, com tensão de escoamento de 250 MPa, tensão de ruptura entre 400 e 500 MPa e módulo de elasticidade de aproximadamente 201000 MPa.

Nos programas desenvolvidos, as barras de uma mesma subestrutura são classificadas e agrupadas de acordo com o tipo e posicionamento em: montantes, horizontais, diagonais e

travamentos, conforme pode ser visto nas figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9. Estas figuras mostram uma visão frontal da estrutura, assim as barras do travamento interno não podem ser visualizadas já que estão situadas em um plano horizontal em relação à torre.

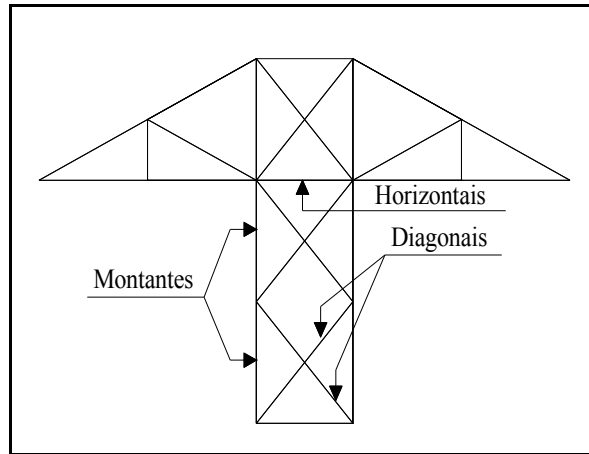


Figura 3.5 – Elementos de barras do tronco da cabeça.

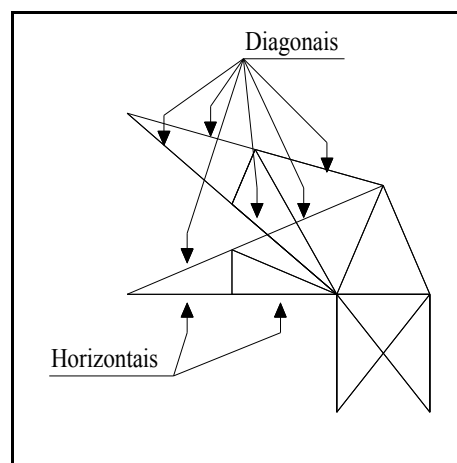


Figura 3.6 – Elementos de barras dos suportes dos pára-raios e mísulas.

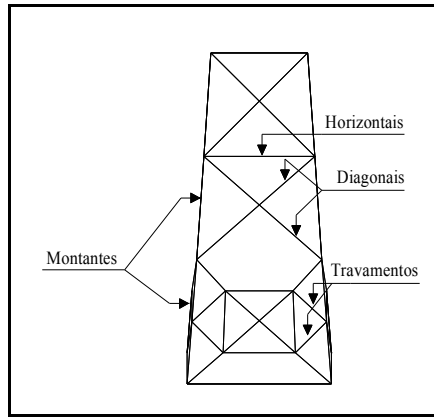


Figura 3.7 – Elementos de barras do tronco básico inferior.

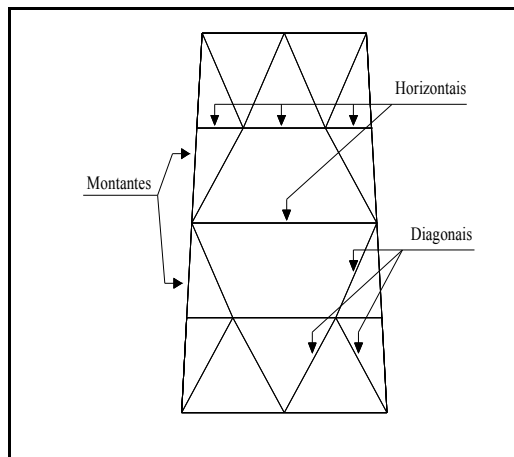


Figura 3.8 – Elementos de barras da extensão.

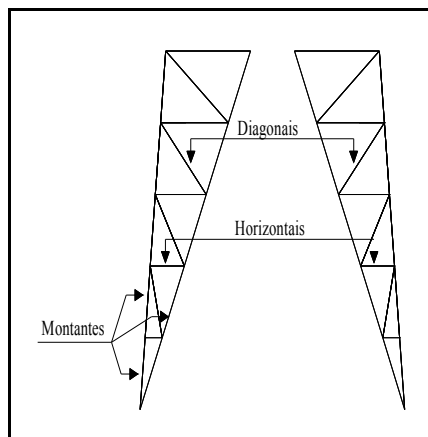


Figura 3.9 – Elementos de barras das pernas.

Assim, cada um destes grupos constitui o que se convencionou chamar de “*site*” das barras, ou seja, todos os montantes de uma mesma subestrutura constituem um primeiro *site*, as

barras horizontais constituem um segundo *site* e assim por diante, conforme pode ser visto nas figuras 3.10 e 3.11. Logo, cada subestrutura possuirá quatro *sites* distintos (montantes, horizontais, diagonais e travamentos), exceto os suportes dos cabos pára-raios e mísulas, que possuem apenas dois *sites* (horizontais e diagonais).

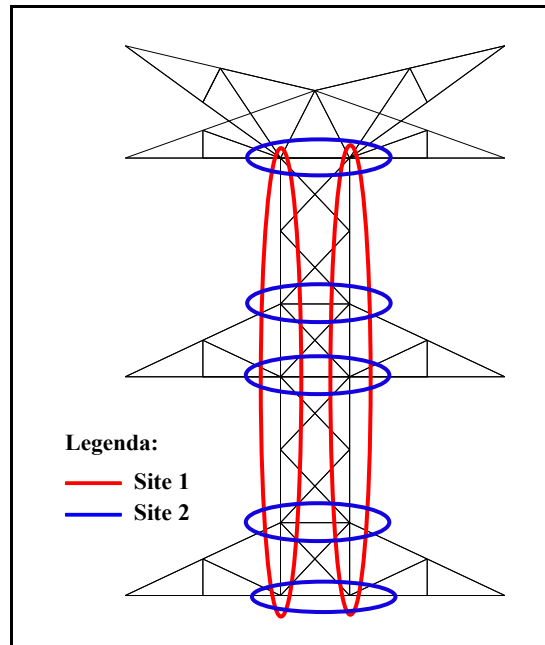


Figura 3.10 – *Sites* da cabeça da torre.

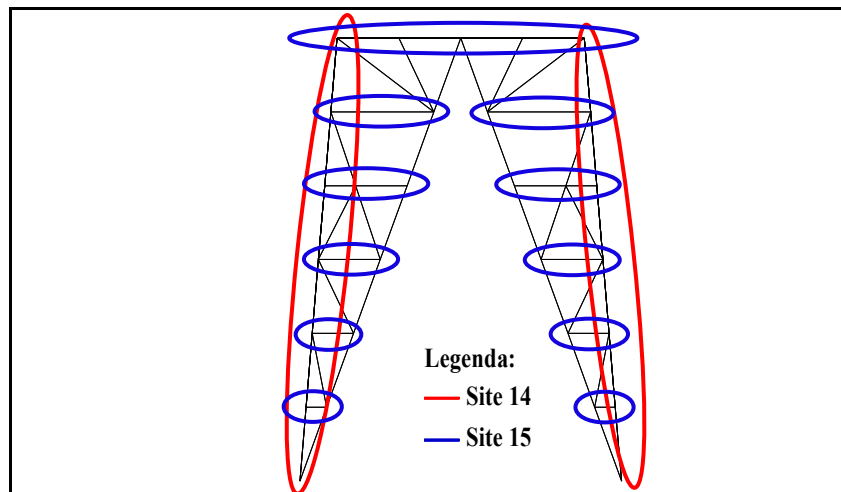


Figura 3.11 – *Sites* das pernas da torre.

Na etapa de dimensionamento, onde é feita a verificação da capacidade resistente dos elementos de treliça, o maior esforço de tração e compressão é determinado por *site*, sendo todas as barras de um mesmo *site* dimensionadas para estes esforços solicitantes. Logo,

todas as barras pertencentes à mesma subestrutura e de um mesmo *site* possuirão a mesma seção transversal.

3.3 – CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo Labegalini *et al* (1992), os cabos das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica podem ser considerados suficientemente flexíveis quando os pontos de suspensão estiverem razoavelmente afastados entre si, de forma a descreverem, quando suspensos, curvas semelhantes a catenárias. Portanto, os esforços axiais, o comprimento do cabo, as reações de apoio nos pontos de fixação dos cabos e a flecha são calculadas a partir de formulações baseadas na equação da catenária. É importante ressaltar que nesse trabalho, os pontos de suspensão dos cabos são considerados a uma mesma altura.

Na figura 3.12 é mostrado um sistema que representa um cabo suspenso em dois suportes (A e B) de mesma altura separados entre si por uma distância (vão) L . Nas linhas de transmissão, as alturas de suspensão (H) dos cabos estão diretamente relacionadas com o valor das distâncias dos vértices das curvas ao solo (h_s) e da flecha (f).

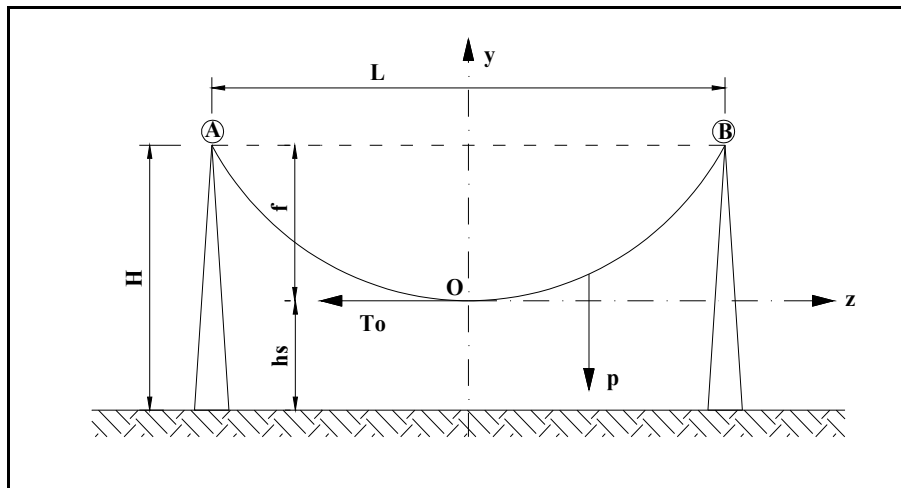


Figura 3.12 – Cabo suspenso em dois suportes de mesma altura.

Na figura 3.12 tem-se que:

- L : vão;
H : altura de suspensão;
hs : distância do vértice da curva do cabo ao solo;
f : flecha;
To : tração no ponto O (meio do vão);
p : peso do cabo por unidade de comprimento;

Deste modo, a equação da catenária pode ser dada por:

$$y = \frac{T_o}{p} \left[\cosh \left(\frac{z}{T_o/p} \right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

Fazendo $C_1 = T_o/p$, temos:

$$y = C_1 \cdot \left[\cosh \left(\frac{z}{C_1} \right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

O termo $\cosh z/C_1$ pode ser desenvolvido em série:

$$\cosh \frac{z}{C_1} = 1 + \frac{z^2}{2C_1^2} + \frac{z^4}{4!C_1^4} + \frac{z^6}{6!C_1^6} + \dots + \frac{z^n}{n!C_1^n} \quad (3.3)$$

Nas linhas de transmissão, o valor de C_1 é muito grande, dessa forma, a série converge rapidamente. Nesse caso podemos empregar apenas os dois primeiros termos da série, obtendo assim a equação da parábola:

$$y = \frac{z^2}{2C_1} = \frac{pz^2}{2T_o} \quad (3.4)$$

No cálculo das flechas é indicado empregar a equação da catenária, entretanto, os valores obtidos com a equação da parábola apresentam erros toleráveis. Dessa forma, substituindo $z = L/2$ e $y = f$ na equação 3.4, obtemos:

$$f = \frac{pL^2}{8T_0} \quad (3.5)$$

3.3.1 – CABOS DE GUARDA OU PÁRA-RAIOS

Os cabos de guarda ou pára-raios são utilizados para interceptar as descargas atmosféricas, evitando que essas descargas atinjam os condutores, diminuindo as possibilidades de interrupções do fornecimento de energia elétrica.

Os tipos de cabos pára-raios mais empregados são: cordoalha de fios de aço zincada, cabos CAA extra-fortes e cabos de aço-alumínio. Neste estudo, foram utilizadas cordoalhas de fios de aço zincada com resistência mecânica extra-forte EAR (EHS), identificada pelo diâmetro nominal em polegadas

3.3.2 – CABOS CONDUTORES

Os condutores das linhas de transmissão são considerados os elementos ativos por estarem normalmente energizados. O custo dos condutores representa cerca de 60% do custo dos materiais de uma linha de transmissão, sendo a sua escolha baseada em função das características técnicas e econômicas.

Na escolha do material que deve ser utilizado para os condutores, é fundamental considerar as seguintes características:

- **Alta condutibilidade:** o material deve ter baixa resistência elétrica, de modo que as perdas por efeito joule possam ser mantidas, dentro de limites economicamente rentáveis, considerando o custo de transporte de energia.

- **Elevada resistência mecânica:** a resistência mecânica é responsável pela integridade física dos condutores, garantindo a continuidade do serviço e segurança das instalações. Quanto maior for a resistência mecânica, mais econômico será o projeto da linha, com o aumento do rendimento de utilização das estruturas.
- **Baixo peso específico:** quanto menor o peso específico dos condutores, menores serão os esforços mecânicos transmitidos as estruturas, conseqüentemente serão utilizadas estruturas mais leves e mais econômicas.
- **Alta resistência à oxidação:** o material deve ser resistente às condições agressivas do ambiente uma vez que com a oxidação ocorre a perda da secção útil do condutor, provocando a redução da sua resistência mecânica e eventual ruptura do condutor.

Os materiais que atendem a estas características são: cobre e alumínio, bem como ligas de alumínio, que são empregados em larga escala comercial.

Inicialmente foram utilizados os cabos de cobre que apresentavam como vantagens: alta condutibilidade, elevada resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Em 1895, foram construídas as primeiras linhas de transmissão com cabos de alumínio, porém, naquela época, apresentavam a desvantagem de ter um preço mais elevado que o cobre.

Em 1913, os cabos de alumínio com alma de aço CAA ou ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), foram utilizados com sucesso na linha BIG CREER na Califórnia, pois estes cabos apresentavam todas as vantagens quando comparado com os de cobre.

Atualmente, os tipos de cabos condutores mais empregados em linhas de transmissão são: CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço) ou ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) e CA (Cabos de Alumínio) ou AAC (All Aluminum Conductor).

A nomenclatura e o processo usado na construção dos cabos de aço podem ser observados no modelo da figura 3.13. O tipo da construção indica quantas pernas tem o cabo, quantos arames possuem cada perna, etc. Os cabos de aço são catalogados de acordo com essas características.

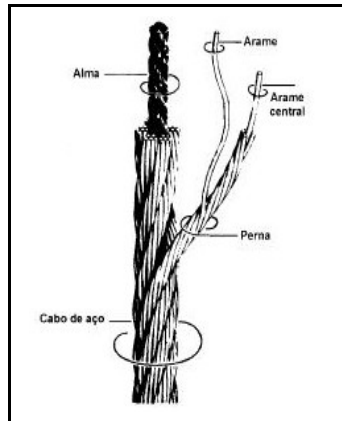


Figura 3.13 - Nomenclatura empregada na fabricação de cabos de aço (Pasquetti, 2003).

Os cabos CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço) ou ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) são constituídos de uma ou mais camadas concêntricas de fios de alumínio ECH-19 encordoados sobre uma alma de aço de alta resistência, galvanizado, constituído de um único fio ou de vários fios encordoados, dependendo da bitola do cabo, conforme mostra a figura 3.14.

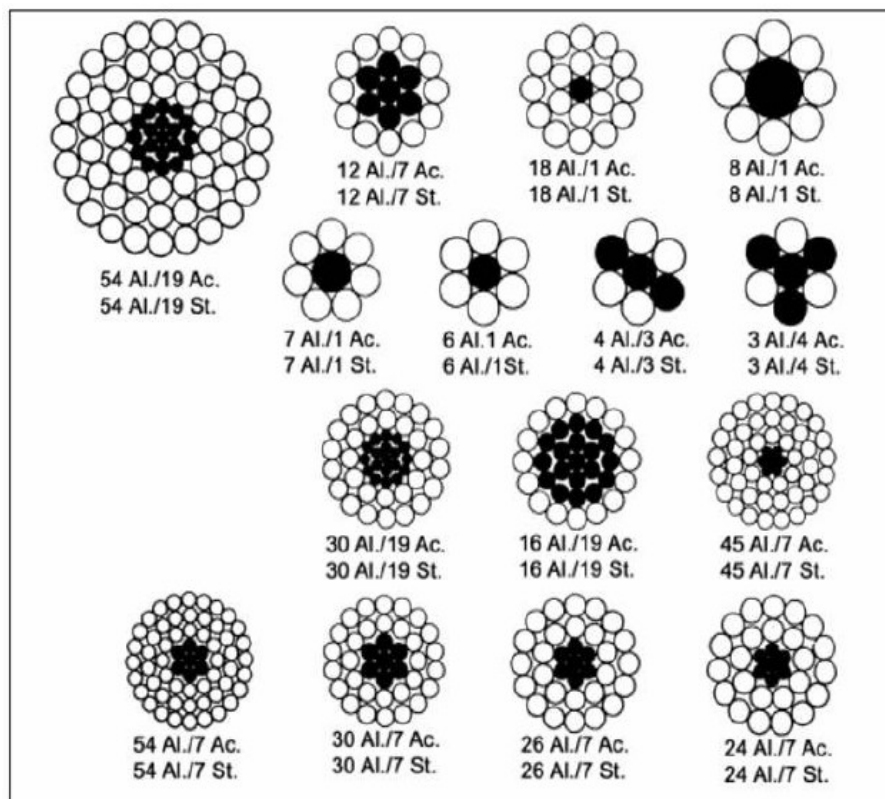


Figura 3.14 – Formação dos cabos CAA ou ACSR.

A função da alma de aço é dar maior resistência mecânica ao cabo. A corrente elétrica circulará praticamente nos fios de alumínio. O número de fios de alumínio e de fios de aço dá a formação do cabo. Diferentes formações correspondem a diferentes relações peso/carga de ruptura e, para cada peso específico haverá uma relação alumínio/aço ótima no cabo.

Em geral o cabo é denominado pela sua bitola e formação. A bitola pode ser dada em MCM que corresponde somente à área de alumínio no cabo. Um CM é uma unidade de área que corresponde à área de um círculo cujo diâmetro é igual a um milésimo da polegada, ou $0,00064516 \text{ mm}^2$.

Os cabos CA (Cabos de Alumínio) ou AAC (All Aluminum Conductor) são compostos de vários fios de alumínio ECH-19 encordoados. Para um mesmo percentual de tensão em relação à carga de ruptura, esse tipo de cabo apresenta flechas superiores às do cabo ACSR, pois apresenta relações peso/carga de ruptura superior às do cabo ACSR. Este tipo de cabo é uma boa alternativa para as linhas de transmissão urbanas, onde os vãos são menores e as deflexões no traçado são maiores, dessa forma utilizando estruturas mais econômicas.

A escolha do tipo de condutor a ser utilizado nas linhas de transmissão deverá levar em conta as diferentes relações peso/carga de ruptura, resistências elétricas/custos associados, além de outras características, como por exemplo, a definição de um padrão adotado em cada empresa.

O dimensionamento dos cabos condutores de um sistema de transmissão é função basicamente da potência necessária a ser transportada, da distância entre subestações fonte e carga, do nível de tensão de operação e finalmente em função de considerações de ordem econômica. Além disso, são considerados diversos fatores como: níveis de tensão, queda de tensão admissível, custo dos condutores, condições ambientais, etc. Neste trabalho foram utilizados os cabos CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço).

3.4 – HISTÓRICO DE ALGUNS ACIDENTES ENVOLVENDO LINHAS DE TRANSMISSÃO

No Brasil, os ventos fortes são responsáveis pela maioria dos acidentes com torres metálicas treliçadas usadas em linhas de transmissão de energia elétrica. Existem inúmeros registros de acidentes como os ilustrados na figura 3.15, que em alguns casos, causaram enormes prejuízos para as empresas do setor elétrico e inúmeros transtornos para os consumidores devido às interrupções do fornecimento de energia. Entre as prováveis causas do colapso das torres podemos destacar: baixos valores dos coeficientes de força adotados nos projetos deste tipo de estrutura, falhas no cálculo do momento de tombamento, etc.

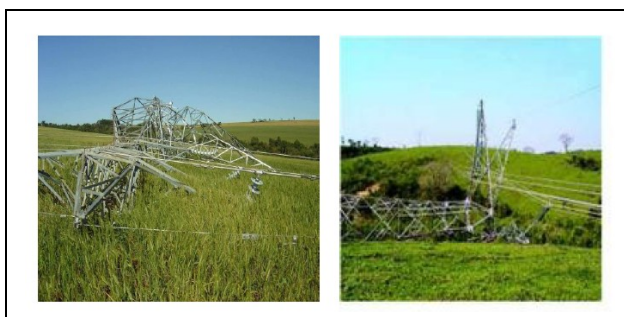


Figura 3.15 – Exemplo de acidentes com torres de linhas de transmissão.

Blessmann (2001) reproduziu trechos de revistas de São Paulo, informando que no período de novembro de 1970 a junho de 1983 ocorreram 20 acidentes na CESP (Companhia Energética de São Paulo), com queda ou inclinação acentuada de estruturas de linhas de transmissão, atingindo 143 estruturas.

Em novembro de 1997, a queda de 10 torres do sistema de transmissão de Itaipu (LT Foz do Iguaçu-Ivaiporã de 750 kV), provocada pela ação de ventos médios de 130 km/h, acarretou em racionamento de energia para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. O acidente interrompeu a transmissão de 5000 MW ao sistema interligado, obrigando o corte de energia para cerca de um milhão de pessoas no Estado de São Paulo (Rippel, 2005).

Fortes ventos que atingiram a região norte do Mato Grosso, em setembro de 2004, provocaram a queda de quatro torres metálicas da linha de transmissão Coxipó-Sinop da Eletronorte, deixando 350 mil pessoas de 25 municípios sem energia (O & M, 2004).

Em maio de 2005, ventos atingiram parte do município de Indaiatuba (a 102 km de São Paulo) derrubando três torres de transmissão de energia (Folha UOL, 2005). No mês seguinte, uma tempestade, derrubou cinco torres de energia e a linha de transmissão entre as cidades de Itutinga e Minduri (Gazeta Mercantil, 2005).

Já em outubro de 2005, uma tempestade com ventos de até 80 km/h derrubou cinco torres de transmissão do sistema Furnas, no oeste do Paraná. As torres que caíram estavam localizadas entre São Miguel do Iguçu e Medianeira (580 km de Curitiba). A queda provocou a interrupção de três linhas de corrente alternada (Agência de Notícias, 2005).

Um vendaval, em setembro de 2006, derrubou três torres da linha Uberaba-Delta e oito entre Igarapava-Delta no estado de Minas Gerais (Jornal da Manhã On Line, 2006).

Os temporais de outubro de 2007, que atingiram a região entre Lagoa Vermelha e Vacaria no Rio Grande do Sul, derrubaram oito torres de transmissão da Rio Grande Energia (RGE) (De Olho no Tempo, 2007).

4 – ANÁLISE ESTÁTICA DO VENTO EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Estruturas reticuladas são constituídas por barras retas e classificadas em quatro tipos principais: treliças, vigas, quadro ou pórticos e grelhas. As torres metálicas usadas em linhas de transmissão de energia elétrica podem ser classificadas como estruturas reticuladas espaciais do tipo treliçada.

Na elaboração de um projeto estrutural é necessário conhecer a velocidade média do vento e as rajadas, que podem ser alteradas consideravelmente dependendo das características topográficas do local e da altura da estrutura. Com estes dados podemos determinar a ação do vento.

4.1 – AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS SEGUNDO A NBR 6123 (FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES)

Segundo a NBR 6123, as forças estáticas do vento são determinadas a partir da velocidade básica (V_0) que é a velocidade de uma rajada de três (03) segundos, que ultrapassa em média esse valor uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano.

As velocidades básicas (V_0) são fornecidas através de curvas de igual velocidade (isopletas), conforme ilustra a figura 4.1. Esses dados foram processados estatisticamente, com base nos valores de velocidades máximas anuais medidas em cerca de 49 cidades brasileiras; foram desprezados os valores inferiores a 30 m/s. Considera-se que o vento pode atuar em qualquer direção e no sentido horizontal.

No projeto estrutural, a velocidade usada nos cálculos é a velocidade característica (V_k) definida por:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4.1)$$

onde: V_0 é a velocidade básica do vento em m/s, S_1 é um fator topográfico que leva em consideração as variações do relevo do terreno, S_2 é um fator que considera a rugosidade

do terreno, as dimensões da edificação e sua altura sobre o terreno e S_3 é um fator estatístico que é determinado considerando o grau de segurança da estrutura e sua vida útil.

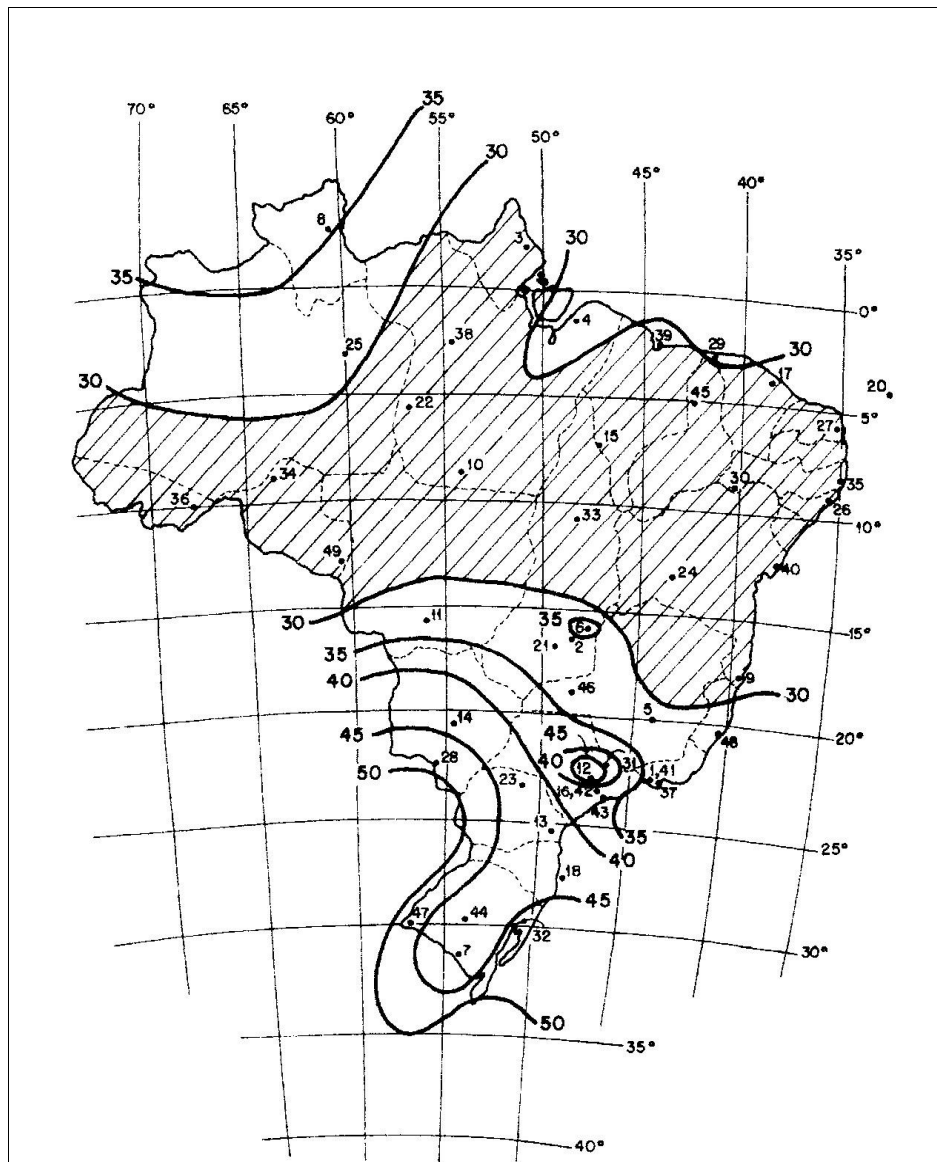


Figura 4.1 –Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) (NBR 6123).

A força global (F_g) do vento é obtida pela soma vetorial de todas as forças que atuam sobre uma edificação ou parte dela. De acordo com Blessmann (1990), há dois modos de decompor a força global. Em um deles, esta força é decomposta nas componentes segundo as direções dos dois eixos coordenados O_x e O_y : F_x e F_y , no caso de escoamento bidimensional. No outro, a força global é decomposta em uma componente na direção do vento e em outra perpendicular a esta direção, designadas respectivamente de força de arrasto (F_a) e força lateral (F_l), conforme mostra a figura 4.2.

A força de arrasto (F_a) é obtida pela expressão (4.2):

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (4.2)$$

onde: C_a é o coeficiente de arrasto, q é a pressão dinâmica e A_e é a área frontal efetiva (área da projeção ortogonal da estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento).

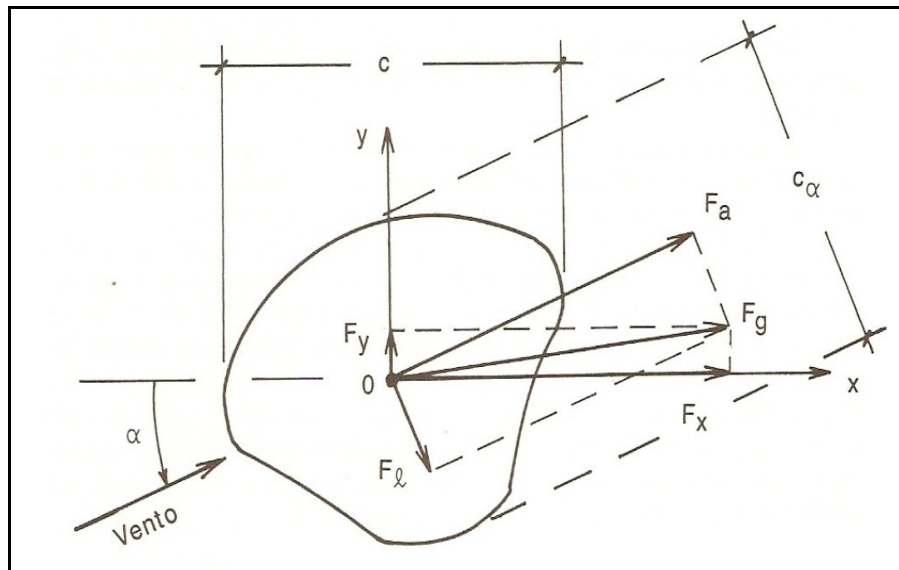


Figura 4.2 – Forças aerodinâmicas (Blessmann, 1990).

A pressão dinâmica (q) pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$q = \frac{1}{2} \rho V_k^2 \quad (4.3)$$

Onde: ρ é a massa específica do ar e V_k é a velocidade característica.

Para o cálculo da pressão dinâmica a norma brasileira NBR 6123 adota condições normais de pressão e temperatura, 1 atm e 15° C, respectivamente. Assim, temos que:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (4.4)$$

sendo: V_k em m/s e q em N/m².

Os valores do coeficiente de arrasto (C_a) podem ser obtidos para algumas formas de torres por intermédio de um gráfico apresentado pela NBR 6123. Este gráfico relaciona o índice de área exposta (ϕ) com o coeficiente de arrasto (C_a). O índice de área exposta (ϕ) é definido como sendo a razão entre a área frontal efetiva da torre (A_e) e a área frontal da superfície (A) limitada pelo contorno:

$$\phi = \frac{A_e}{A} \quad (4.5)$$

Segundo Blessmann (1990), o primeiro problema que surge na prática é o de como, a partir do perfil vertical de pressões dinâmicas, determinar a força correspondente. Para torres metálicas treliçadas o cálculo das forças e do momento de tombamento será feito considerando um perfil contínuo, admitindo-se inicialmente na dedução das fórmulas, uma edificação com área toda cheia sendo finalmente corrigida para estruturas treliçadas, ou seja, em função do índice de área exposta.

Conforme a figura 4.3, a força de arrasto para uma faixa de largura $l_1(z)$ e altura dz é dada por:

$$df_a = C_a \cdot q(z) \cdot l_1(z) \cdot dz \quad (4.6)$$

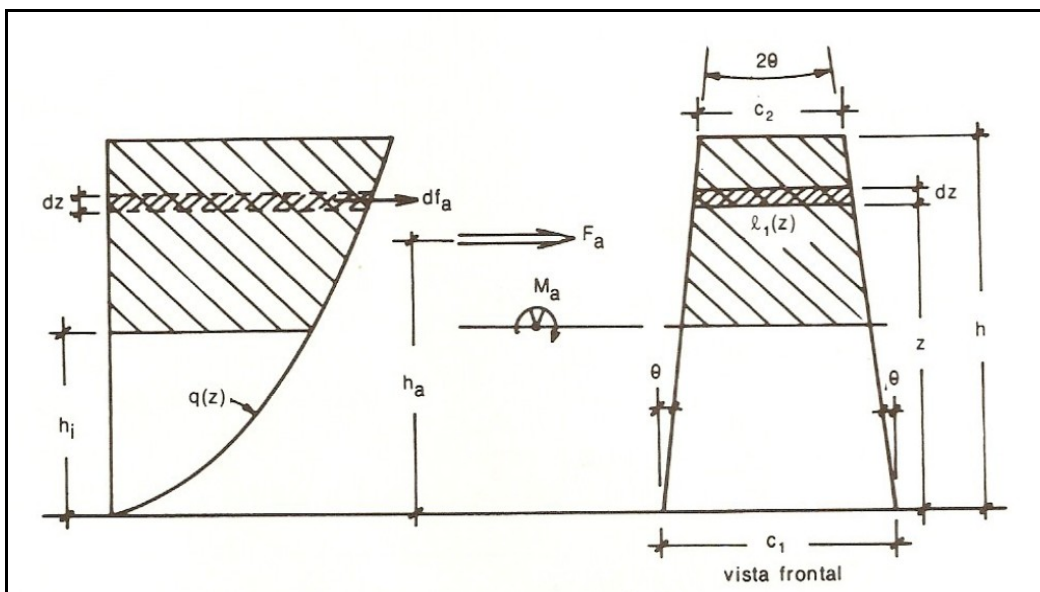


Figura 4.3 – Perfil contínuo (Blessmann, 1990).

E para a região situada entre o topo da edificação h e a altura h_i , a força de arrasto parcial será dada por:

$$F_a = \int_{h_i}^h df_a \quad (4.7)$$

Substituindo (4.6) em (4.7) temos:

$$F_a = C_a \cdot \int_{h_i}^h q(z) \cdot l_1(z) \cdot dz \quad (4.8)$$

Pelo Teorema de Varignon:

$$F_a \cdot h_a = \int_{h_i}^h z \cdot df_a \quad (4.9)$$

Substituindo as equações (4.6) e (4.8) em (4.9) e isolando h_a , temos:

$$h_a = \frac{\int_{h_i}^h q(z) \cdot l_1(z) \cdot z \cdot dz}{\int_{h_i}^h q(z) \cdot l_1(z) \cdot dz} \quad (4.10)$$

O momento de tombamento para a altura h_i será:

$$Ma_i = F_a \cdot (h_a - h_i) \quad (4.11)$$

Da figura 4.3 podemos obter $l_1(z)$:

$$l_1(z) = c_1 - 2 \cdot z \cdot \text{tg}\theta \quad (4.12)$$

e:

$$h \operatorname{tg}\theta = \frac{c_1 - c_2}{2} \quad (4.13)$$

Logo:

$$2\operatorname{tg}\theta = \frac{c_1 - c_2}{h} \quad (4.14)$$

Segundo a NBR 6123 a função $q(z)$ pode ser obtida por:

$$q(z) = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (4.15)$$

Sendo V_k dado pela equação (4.1), temos:

$$q(z) = 0,613 \cdot (V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3)^2 \quad (4.16)$$

A equação (4.16) pode ser reescrita como:

$$q(z) = K_1 \cdot S_2^2 \quad (4.17)$$

Sendo:

$$K_1 = 0.613 \cdot (V_0 \cdot S_1 \cdot S_3)^2 \quad (4.18)$$

Pela NBR 6123:

$$S_2 = b \cdot \operatorname{Fr} \cdot (z/10)^p \quad (4.19)$$

Sendo que os valores dos parâmetros b , F_r e p para os diversos intervalos de tempo e para as cinco categorias de rugosidade do terreno são obtidos a partir da tabela apresentada pela norma anteriormente citada.

Substituindo a equação (4.19) em (4.17) obtemos:

$$q(z) = K_1 \cdot \left(\frac{b.Fr}{10^p} \right)^2 \cdot z^{2p} \quad (4.20)$$

Introduzindo o parâmetro K_2 como sendo:

$$K_2 = K_1 \cdot \left(\frac{b.Fr}{10^p} \right)^2 \quad (4.21)$$

Pode-se obter $q(z)$ como:

$$q(z) = K_2 \cdot z^{2p} \quad (4.22)$$

Substituindo as equações (4.22) e (4.12) em (4.8) e resolvendo a integral, obtemos:

$$F_a = K_2 \cdot C_a \cdot \left[\frac{c_1}{2.p+1} \cdot (h^{2p+1} - h_i^{2p+1}) - \frac{2.tg\theta}{2.p+2} \cdot (h^{2p+2} - h_i^{2p+2}) \right] \quad (4.23)$$

Agora, substituindo as equações (4.12) e (4.22) em (4.10) e resolvendo a integral:

$$h_a = \frac{\frac{c_1}{2p+2} (h^{2p+2} - h_i^{2p+2}) - \frac{2.tg\theta}{2p+3} (h^{2p+3} - h_i^{2p+3})}{\frac{c_1}{2p+1} (h^{2p+1} - h_i^{2p+1}) - \frac{2.tg\theta}{2p+2} (h^{2p+2} - h_i^{2p+2})} \quad (4.24)$$

As equações (4.24), (4.23) e (4.11) resolvem o problema da relação entre o perfil vertical de velocidades médias e o carregamento da estrutura na direção do vento.

Adequando a força de arrasto (F_a) para o caso de torres metálicas treliçadas, onde a área frontal efetiva (A_e) do reticulado é sempre menor que a área frontal (A) da superfície de contorno, o que consideramos por seção da torre, deve-se multiplicar o valor de F_a pelo índice de área exposta (ϕ). Assim, a equação (4.23) adequada a torres treliçadas resulta:

$$F_a = K_2 \cdot C_a \cdot \left[\frac{c_1}{2.p+1} \cdot (h^{2p+1} - h_i^{2p+1}) - \frac{2.tg\theta}{2.p+2} \cdot (h^{2p+2} - h_i^{2p+2}) \right] \cdot \phi \quad (4.25)$$

Como a altura h_a de incidência da F_a não coincide com as cotas dos módulos das torres, deveremos decompor as forças F_a de cada módulo, a fim de obter a parcela do carregamento nodal para cada seção da estrutura. Este procedimento foi utilizado por Guimarães (2000).

Seja i um índice das seções variando de 1 até o número de seções NS. As forças de arrasto F_{a_i} com as respectivas alturas h_{a_i} e os momentos de tombamento Ma_i foram calculados seguindo a formulação apresentada acima. Considerando h_{i_i} como sendo o valor da cota inferior de cada módulo da torre, conforme figura 4.4, temos:

$$Ma_k = \sum_{i=1}^k F_{a_i}(h_{a_i} - h_{i_k}) \quad (4.26)$$

e

$$M_k = F_{a_k} \cdot (h_{a_k} - h_{i_k}) \quad (4.27)$$

Sendo M_k um momento de tombamento produzido somente pela força de arrasto de cada módulo i . Este valor é utilizado na decomposição da respectiva força, em uma parcela atuando na parte superior $F_{a_i,s}$ e outra na parte inferior $F_{a_i,i}$ do respectivo módulo.

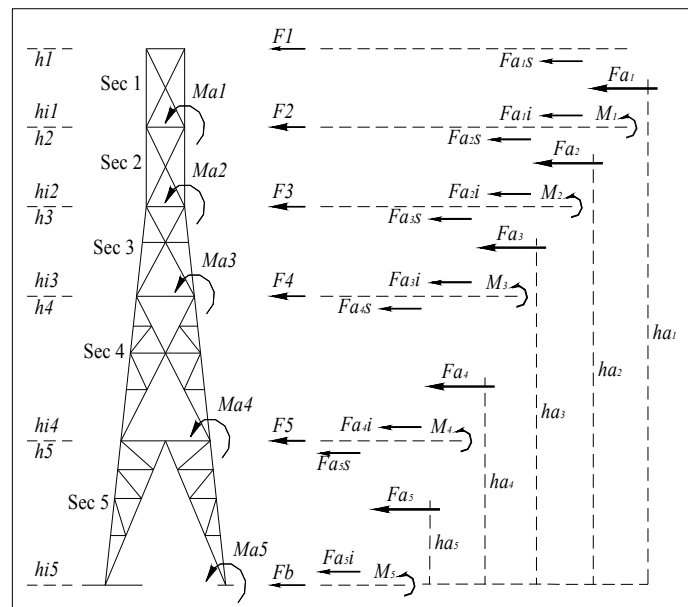


Figura 4.4 – Decomposição vertical para as forças de arrasto (Guimarães, 2000).

Assim fazendo o equilíbrio estático de momentos deste módulo, tem-se:

$$\sum M(h_i) = 0 \Rightarrow Fa_{i,s} \cdot (h_i - h_{i-1}) - Fa_i \cdot (ha_i - h_i) = 0 \quad (4.28)$$

que nos fornece:

$$Fa_{i,s} = \frac{Fa_i(ha_i - h_i)}{h_i - h_{i-1}} \quad (4.29)$$

e no plano horizontal inferior de cada módulo:

$$\sum F = 0 \Rightarrow Fa_{i,i} + Fa_{i,s} = Fa_i \quad (4.30)$$

que fornecerá:

$$Fa_{i,i} = Fa_i - Fa_{i,s} \quad (4.31)$$

possibilitando assim, a decomposição vertical das forças de arrasto.

Finalmente, a força no topo de um módulo i será dada pela soma das parcelas correspondentes à força superior do respectivo módulo $Fa_{i,s}$ e a força no nível inferior do módulo posicionado acima $Fa_{i-1,i}$.

$$F_i = Fa_{i,s} + Fa_{i-1,i} \quad (4.32)$$

Após a obtenção da força de arrasto no topo de cada módulo (subestrutura) conforme apresentado na equação (4.32), esta força será dividida e aplicada nos nós da torre conforme mostra a figura 4.5.

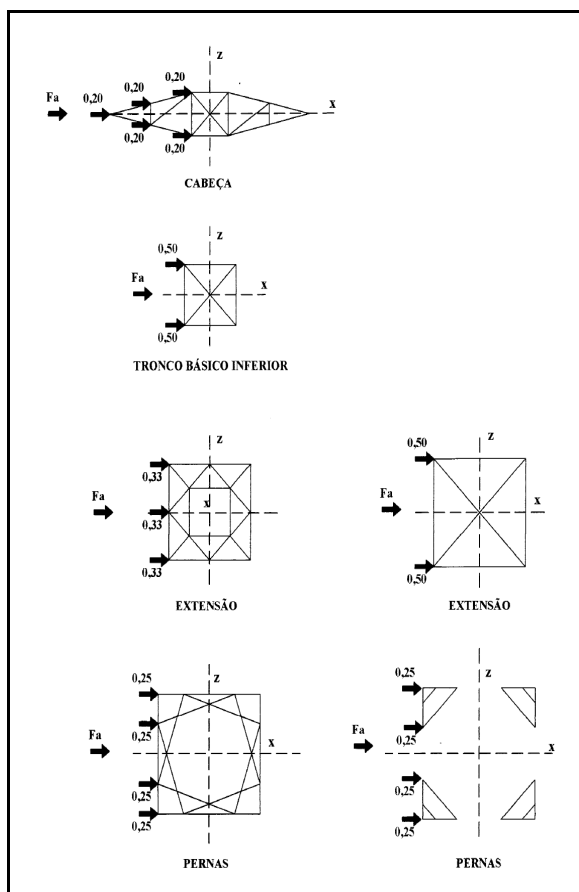


Figura 4.5 – Decomposição horizontal da força de arrasto.

4.2 – AÇÃO DO VENTO NOS CONDUTORES SEGUNDO A NBR 5422 (PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA)

O vento agindo sobre a superfície dos condutores exerce uma pressão que é proporcional à velocidade do vento, sendo sua resultante uma força perpendicular ao eixo longitudinal dos cabos.

Segundo a NBR 5422 essa força, decorrente da ação do vento nos condutores, é dada pela seguinte fórmula:

$$F_c = q_0 \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot d \cdot (L / 2) \cdot \text{sen}^2 \theta \quad (4.33)$$

sendo:

F_c : força devida ao vento nos condutores, em N;

| | |
|----------|--|
| q_0 | : pressão dinâmica de referência; |
| C_{xc} | : coeficiente de arrasto, igual a 1.0; |
| α | : fator de efetividade; |
| d | : diâmetro do cabo, em metros; |
| L | : comprimento do vão considerado, em metros; |
| θ | : ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão. |

Os coeficientes de arrasto para fios e cabos dependem do número de Reynolds (R_e). Trata-se de um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas, podendo ser expresso pela seguinte equação:

$$R_e = \frac{V.l}{\nu} \quad (4.34)$$

onde: V representa a velocidade média do vento, l é uma dimensão característica e ν a viscosidade cinemática do ar. Nesse trabalho, o coeficiente de arrasto para os cabos (C_{xc}) foi considerado igual a 1.

O fator de efetividade α é obtido por intermédio da figura 4.6 em função do vão dos cabos e da categoria do terreno. A NBR 5422 define quatro categorias de terreno cujas características serão listadas a seguir:

- **Categoria A:** vastas extensões de água, áreas planas costeiras, desertos planos;
- **Categoria B:** terreno aberto com poucos obstáculos;
- **Categoria C:** terreno com obstáculos numerosos e pequenos;
- **Categoria D:** áreas urbanizadas, terrenos com muitas árvores altas.

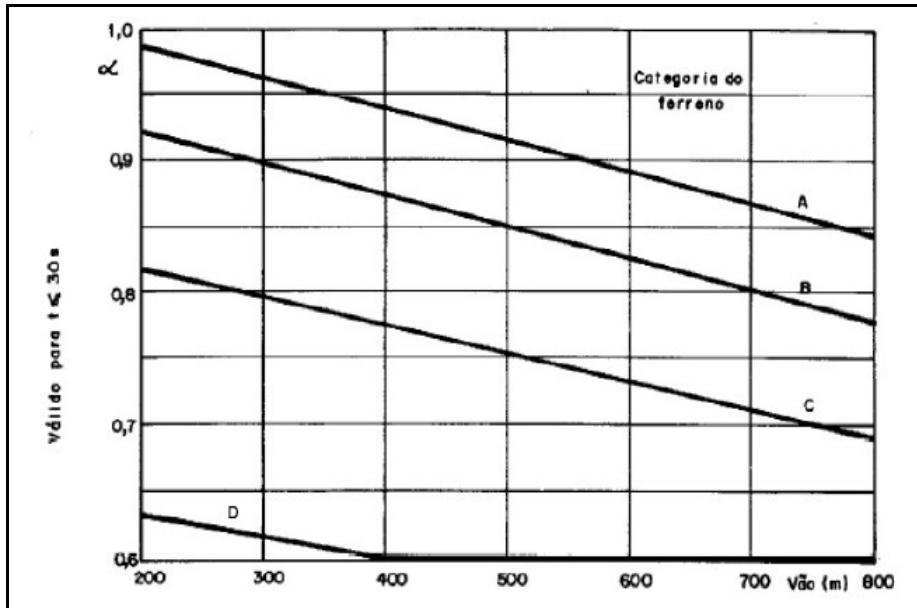


Figura 4.6 – Fator de efetividade α (NBR 5422).

Considera-se que a força devida ao vento se distribui uniformemente ao longo do condutor e se aplica na horizontal, em sentido transversal ao eixo longitudinal dos cabos. No caso de suportes de mesma altura, considerando somente o efeito da força do vento o cabo passará a descrever uma catenária no plano horizontal. O efeito do peso dos condutores, atuando simultaneamente, fará com que a catenária localize-se, na realidade em um plano inclinado em um ângulo γ , em relação ao plano vertical que passa pelo suporte, como mostra a figura 4.7.

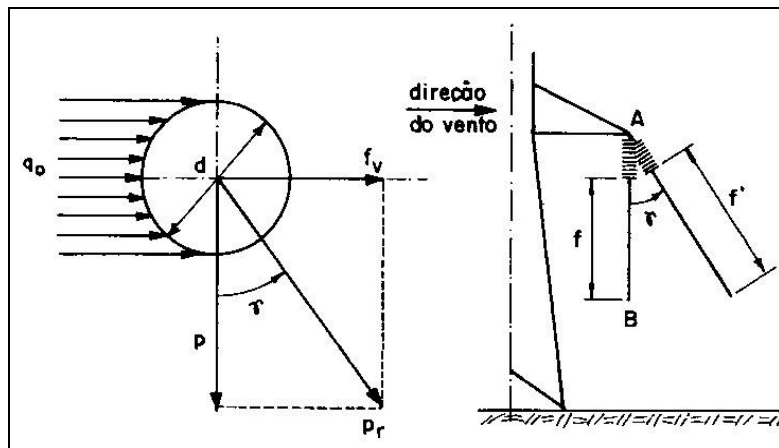


Figura 4.7 – Efeito da pressão do vento sobre os condutores (Labegalini *et al*, 1992).

Além das dimensões físicas, como diâmetro e peso, para o estudo do comportamento mecânico dos cabos é necessário que se conheça sua carga de ruptura, seu coeficiente de expansão térmica e seu módulo de elasticidade. Essas grandezas podem ser obtidas dos

catálogos de fabricantes dos cabos condutores, que variam de acordo com o material que é empregado na sua fabricação.

4.3 – DIMENSIONAMENTO DOS PERFIS E CABOS

Neste trabalho, o dimensionamento dos perfis metálicos baseou-se no critério das tensões admissíveis, pois, a formulação não linear do modelo matemático, utilizada na análise estática, permite grandes deslocamentos e deformações.

Considerando apenas os esforços axiais nos perfis, o critério das tensões admissíveis, conforme a norma do AISC: Manual of Steel Construction - Allowable Stress Design (1989), recomenda que no dimensionamento à tração sejam feitas as seguintes verificações:

1 - Quanto à ruptura da seção líquida que pode ocasionar o colapso da peça, dada a equação:

$$F_{adm}^{t1} = 0,50 F_u A_n \quad (4.35)$$

2 – Quanto ao escoamento da seção bruta que pode implicar em deformações excessivas:

$$F_{adm}^{t2} = 0,60 F_y A_g \quad (4.36)$$

sendo:

F_u : tensão última do material;

F_y : tensão de escoamento do material;

A_n : área líquida da seção transversal (descontando-se as áreas de furos), neste trabalho, considerou-se a área líquida como sendo igual a 75% da área bruta;

A_g : área bruta da seção transversal.

Assim, o esforço resistente à tração admissível é considerado como sendo o menor dos dois valores das verificações acima citadas.

Quanto ao dimensionamento de peças comprimidas, o critério das tensões admissíveis determina que a capacidade resistente à compressão seja definida pelas seguintes equações:

No caso de $Kl/r \leq C_c$:

$$F_{adm} = \frac{Q \left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y A_g}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left(\frac{Kl/r}{C_c} \right) - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad (4.37)$$

No caso de $Kl/r > C_c$:

$$F_{adm} = \frac{12\pi^2 E A_g}{23(Kl/r)^2} \quad (4.38)$$

Sendo:

Kl/r : índice de esbeltez máximo da peça;

E : módulo de elasticidade do material;

F_y : tensão de escoamento do material;

A_g : área bruta da seção transversal;

Q : fator de redução para levar em conta a flambagem local da peça;

C_c : índice de esbeltez limite entre flambagem elástica e inelástica, obtido pela equação (4.38).

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Q F_y}} \quad (4.39)$$

No caso de cantoneiras simples, o fator de redução “Q” será igual a 1, quando for satisfeita a seguinte relação:

$$b/t \leq 76/\sqrt{F_y} \quad (4.40)$$

sendo:

- b : comprimento total da aba na cantoneira;
t : espessura da cantoneira;
 F_y : tensão de escoamento do material, neste trabalho foi empregado o aço ASTM A36, logo, $F_y = 36$ ksi.

No caso deste trabalho, o fator de redução “Q” pode ser considerado igual a 1, pois todos os perfis satisfazem a relação (4.39).

Os índices de esbeltez foram adotados conforme a norma canadense de torres CSA-S37 (1994):

$$\lambda = \frac{Kl}{r_{min}} \quad (4.41)$$

sendo:

- $K = 1.0$: parâmetro que define o comprimento efetivo de flambagem;
l : comprimento da peça;
 r_{min} : raio de giração mínimo da peça.

Além disso, a mesma norma estabelece os limites de índice de esbeltez, cujos valores são apresentados a seguir:

- a) Peças comprimidas:
- montantes: 120;
 - demais peças principais (horizontais, diagonais e travamentos): 200;
 - peças secundárias: 240.
- b) Peças tracionadas: 300.

Partindo da hipótese de que os cabos (pára-raios e condutores) já foram dimensionados conforme os fatores citados no capítulo 3, a única verificação realizada é quanto aos esforços de tração axial na análise com vento, onde a norma brasileira NBR 5422 recomenda que os valores não podem ser superiores a 50% da carga de ruptura, admitindo--se neste trabalho valores até 55%.

5 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático, descrito por Pulino (1991) e aplicado por Menin (2002) no estudo de torres estaiadas, que foi utilizado no programa de análise estática de torres autoportantes de linhas de transmissão. A estrutura foi discretizada empregando-se elementos finitos de dois nós, sendo considerada apenas a rigidez axial.

As formulações do modelo admitem alongamentos nos elementos de cabo para a introdução das forças de tensionamento, podendo também ser usadas para modelar os elementos de treliça, bastando considerar o tensionamento do elemento como sendo nulo. Além disso, este modelo também permite considerar o efeito térmico causado por um aumento ou diminuição de temperatura (ΔT).

O modelo descreve a obtenção da função da energia potencial total do sistema. Através de um algoritmo do tipo Quasi-Newton, as configurações que representam uma posição de equilíbrio estático estável podem ser obtidas como pontos de mínimo local da função energia potencial total, que será escrita em função dos deslocamentos livres do sistema.

5.1 – MODELO NÃO LINEAR PARA CABO TENSIONADO NO ESPAÇO

Para o modelo não linear para cabo tensionado são assumidas as seguintes considerações:

- O material dos cabos será considerado de comportamento linear.
- Os elementos de cabos são considerados retos entre as coordenadas nodais.
- As forças externas atuam somente nos nós dos cabos.
- Só é considerada a rigidez axial dos elementos.

5.1.1 – Deformação longitudinal

A figura 5.1 mostra um elemento de cabo no espaço com sua respectiva representação vetorial. Nesta figura a configuração indeformada do elemento é representada pelo segmento AB, o tensionamento pelo segmento BC e o efeito térmico por BD, de modo que

o cabo indeformado após sofrer o efeito térmico é representado pelo segmento AD. Já a configuração deformada do elemento, ou seja, após sofrer o efeito dos carregamentos nodais externos, é representada pelo segmento A'C'. Os deslocamentos nodais AA' e CC' são indicados pelos vetores p e q respectivamente (Menin, 2002).

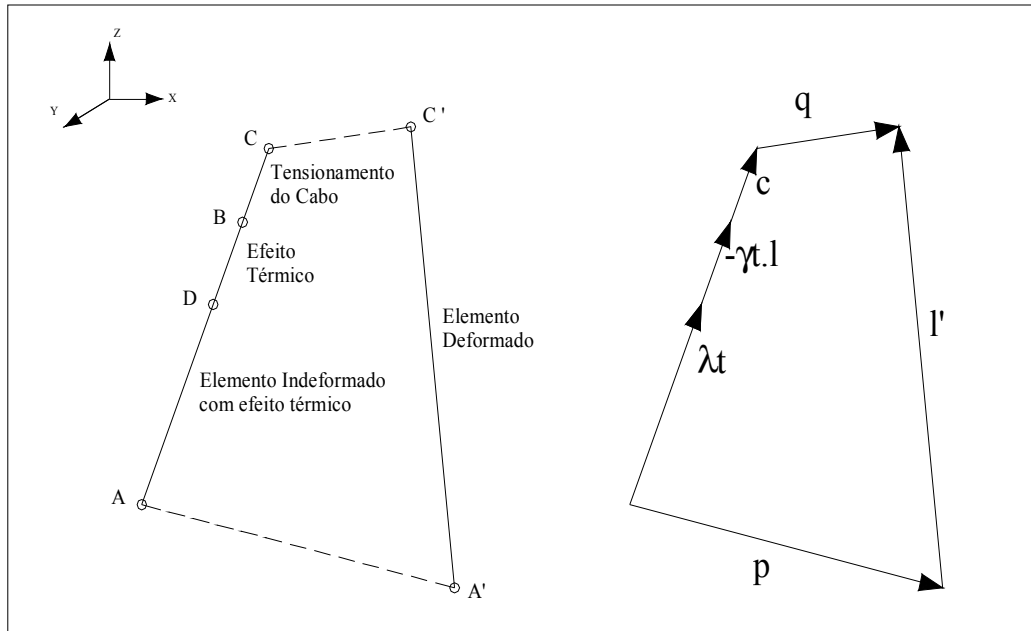


Figura 5.1 – Modelo não linear de elemento de cabo no espaço e sua representação vetorial (Menin, 2002).

Sendo:

- $\mu = \|c\|$: módulo do vetor c ;
- $\mu_t = \|\gamma_t \cdot l\|$: módulo do vetor $\gamma_t \cdot l$;
- λc : vetor que representa a distância entre nós (segmento AC);
- l : vetor que representa o comprimento inicial do cabo (segmento AB);
- $\gamma_t \cdot l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$: efeito térmico, sendo α o coeficiente de dilatação térmica;
- λ_t : vetor que representa a configuração indeformada com efeito térmico;
- l' : vetor com a configuração deformada;
- p, q : deslocamentos nodais na extremidade inicial e final.

Pode-se verificar a partir da figura 5.1 que:

$$p + l' = \lambda_t - \gamma_t l + c + q \quad (5.1)$$

$$l' = \lambda_t - \gamma l + c + q - p \quad (5.2)$$

Fazendo:

$$z = q - p + c - \gamma l \quad (5.3)$$

Tem-se:

$$l' = \lambda_t + z \quad (5.4)$$

A deformação longitudinal do elemento pode então ser dada por:

$$\epsilon = \frac{\|l'\| - \|\lambda_t\|}{\|\lambda_t\|} \quad (5.5)$$

Lembrando que:

$$\|l'\| = \sqrt{(\lambda_t + z)^T \cdot (\lambda_t + z)} \quad (5.6)$$

Sendo:

$$\lambda_t = (\lambda_c - c + \gamma l) = L_t u \quad \Rightarrow \quad \|\lambda_t\| = \|L_t u\| = L_t \|u\| = L_t \quad (5.7)$$

Onde:

u : vetor dos cossenos diretores do elemento de cabo na configuração indeformada.

L_t : comprimento do elemento de cabo com efeito térmico.

Portanto, substituindo-se (5.7) em (5.6):

$$\|l'\| = \sqrt{(L_t u + z)^T \cdot (L_t u + z)}$$

$$\|l'\| = \sqrt{L_t^2 u^T u + L_t u^T z + z^T L_t u + z^T z} \quad (5.8)$$

Sabendo que:

$$u = (\cos\eta, \cos\gamma, \cos\xi) \quad (5.9)$$

Então:

$$u^T u = \cos^2\eta + \cos^2\gamma + \cos^2\xi = 1 \quad \text{e} \quad L_t u^T z = z^T L_t u \quad (5.10)$$

Substituindo (5.10) em (5.8):

$$\|l'\| = \sqrt{L_t^2 + 2.L_t z^T u + z^T z} \quad (5.11)$$

Substituindo-se (5.7) e (5.11) em (5.5):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L_t^2 + 2.L_t z^T u + z^T z} - L_t}{L_t}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 + L_t^{-1} z^T (2u + L_t^{-1} z)} - 1 \quad (5.12)$$

Fazendo:

$$\delta = L_t^{-1} z^T (2u + L_t^{-1} z) \quad (5.13)$$

Tem-se que a deformação longitudinal de um elemento de cabo será:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \delta} - 1 \quad (5.14)$$

5.1.2 – Energia potencial total

Sabendo que, a energia de deformação de um elemento de cabo com deformação constante é dada por:

$$\pi = \int_V \left[\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) . d\varepsilon \right] dV \quad (5.15)$$

Sendo:

- $\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon$: tensão no elemento de cabo;
E : módulo de elasticidade do material;
 ε : deformação longitudinal;
V : volume do elemento de cabo.

E que, para um cabo com seção constante (α_c) e comprimento L_t , temos:

$$\pi = L_t \cdot \alpha_c \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5.16)$$

Portanto, a energia potencial total para um conjunto de “n” elementos de cabo será dada por:

$$\Pi(x) = \sum_{i=1}^n \pi - f^T x + \Pi_0 \quad (5.17)$$

Onde:

- π : energia de deformação de cada elemento de cabo;
f : vetor que contém as forças nodais externas;
x : vetor com deslocamentos nodais livres do sistema;
 Π_0 : energia potencial inicial do sistema.

5.1.3 – Gradiente da energia potencial total

A partir da função da energia potencial total do sistema pode-se determinar a configuração de equilíbrio da estrutura, para isso devem ser determinados pontos de mínimo para esta função.

O gradiente da função energia potencial total de um arranjo de cabos tensionados é dado pela derivada em relação aos x_i deslocamentos livres do sistema como:

$$\nabla \Pi (x) = \frac{\partial \Pi (x)}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^n \nabla \pi - f \quad (5.18)$$

Para um elemento de cabo, o gradiente da energia de deformação é dado por:

$$\nabla \pi = \alpha_c L_t \cdot \nabla \int_0^{\varepsilon} \sigma (\varepsilon) d\varepsilon$$
$$\nabla \pi = \alpha_c L_t \cdot \sigma (\varepsilon) \cdot \nabla \varepsilon \quad (5.19)$$

Para estabelecer o gradiente da energia de deformação da equação (5.19), será necessário determinar o gradiente da deformação ($\nabla \varepsilon$) de um elemento de cabo. Como cada elemento de cabo tem no máximo seis graus de liberdade (três translações por nó), conforme pode ser visto na figura 5.2, a deformação longitudinal será função desses seis deslocamentos (x_k , $k = 1, 2, \dots, 6$) (Menin, 2002).

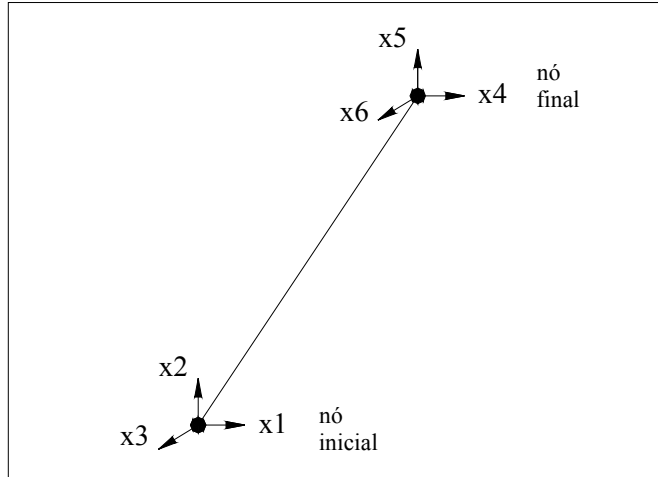


Figura 5.2 – Deslocamentos de um elemento de cabo no espaço (Menin, 2002).

Da equação 5.14, temos que:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \delta} - 1$$

Logo:

$$\nabla \varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_K} = \frac{1}{2} (1 + \delta)^{-1/2} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial x_K} \quad (5.20)$$

De acordo com as equações (5.13), (5.3) e (5.9), temos:

$$\delta = L_t^{-1} z^T (2u + L_t^{-1} z) = 2L_t^{-1} z^T u + L_t^{-2} z^T z$$

$$z = q - p + c - \gamma l = [(x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta), (x_5 - x_2 + (\mu - \mu_t) \cos \gamma), (x_6 - x_3 + (\mu - \mu_t) \cos \xi)]$$

$$u = (\cos \eta, \cos \gamma, \cos \xi)$$

Fazendo $k = 1$:

$$\frac{\partial \delta}{\partial x_1} = 2L_t^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x_1} (z^T u) + L_t^{-2} \cdot \frac{\partial}{\partial x_1} (z^T z) \quad (5.21)$$

Mas:

$$z^T u = (x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta) \cos \eta + (x_5 - x_2 + (\mu - \mu_t) \cos \gamma) \cos \gamma + (x_6 - x_3 + (\mu - \mu_t) \cos \xi) \cos \xi$$

$$z^T z = (x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta)^2 + (x_5 - x_2 + (\mu - \mu_t) \cos \gamma)^2 + (x_6 - x_3 + (\mu - \mu_t) \cos \xi)^2$$

Portanto:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (z^T u) = -\cos \eta \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (z^T z) = -2(x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta) \quad (5.23)$$

Substituindo as equações (5.22) e (5.23) na equação (5.21):

$$\frac{\partial \delta}{\partial x_1} = -2L_t^{-1} [\cos \eta + L_t^{-1} \cdot (x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta)] \quad (5.24)$$

Logo:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = -L_t^{-1} (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \eta + L_t^{-1} \cdot (x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta)] \quad (5.25)$$

Procedendo de forma análoga para $k = 2, 3, 4, 5$ e 6 :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = -L_t^{-1} (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \gamma + L_t^{-1} \cdot (x_5 - x_2 + (\mu - \mu_t) \cos \gamma)] \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} = -L_t^{-1} (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \xi + L_t^{-1} \cdot (x_6 - x_3 + (\mu - \mu_t) \cos \xi)] \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_4} = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_5} = - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_6} = - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} \quad (5.30)$$

O gradiente da energia de deformação será:

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_1} = -\alpha_c E \varepsilon (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \eta + L_t^{-1} \cdot (x_4 - x_1 + (\mu - \mu_t) \cos \eta)] \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_2} = -\alpha_c E \varepsilon (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \gamma + L_t^{-1} \cdot (x_5 - x_2 + (\mu - \mu_t) \cos \gamma)] \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_3} = -\alpha_c E \varepsilon (1 + \delta)^{-1/2} [\cos \xi + L_t^{-1} \cdot (x_6 - x_3 + (\mu - \mu_t) \cos \xi)] \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_4} = - \frac{\partial \pi}{\partial x_1} \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_5} = - \frac{\partial \pi}{\partial x_2} \quad (5.35)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_6} = - \frac{\partial \pi}{\partial x_3} \quad (5.36)$$

6 – PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo serão apresentados os programas utilizados na análise estática das torres metálicas autoportantes tipo tronco-piramidal quando submetidas às ações devidas ao vento. É importante salientar que estes programas foram desenvolvidos em linguagem Pascal utilizando o compilador Free-Pascal, além disso, foram baseados nos programas desenvolvidos por Menin (2002), logo, também serão apresentadas as principais diferenças entre os programas.

6.1 – PROGRAMA GTAU

O programa GTAU (Gerador de Torres Autoportantes) tem com função principal gerar a geometria de torres autoportantes do tipo tronco-piramidal, fornecendo os nós, conectividade dos elementos e nós restringidos, além das propriedades e parâmetros necessários na análise estática. Este programa foi baseado no programa GTEQ (Gerador de Torres Estaiadas Quadradas) desenvolvido por Menin (2002).

O programa GTAU é composto por cinco blocos principais, como mostra o fluxograma da figura 6.1. As principais características dos blocos e as diferenças mais significativas entre os dois programas (GTEQ e GTAU) serão descritos a seguir:

ENTRADA DE DADOS: Nesta etapa do programa GTEQ é feita a leitura de alguns parâmetros necessários para a geração de uma torre estaiada quadrada. Para o programa GTAU é feita a leitura do arquivo tipo “texto” contendo alguns parâmetros necessários para a geração de uma torre autoportante do tipo tronco-piramidal, tais como: bitolas dos cabos e treliças, comprimento de cada subestrutura da torre, comprimentos dos cabos, diâmetros e encurtamentos nos elementos de cabos, fatores de efetividade, etc. As torres possuem geometrias totalmente distintas, assim no programa GTAU, o número de parâmetros da entrada de dados é bem maior quando comparado com o programa GTEQ. Além disso, as bitolas dos cabos e barras do programa GTEQ são definidas em função da altura da torre e não pelo usuário como realizado no programa GTAU.

GERAÇÃO DE NÓS: Os dois programas utilizam a mesma ordem de geração dos nós, ou seja, de cima para baixo. Assim, no programa GTAU são gerados primeiramente os nós da cabeça, em seguida os dos suportes dos pára-raios e mísulas, tronco, extensão e pernas, finalmente, são gerados os nós dos cabos (pára-raios e condutores).

GERAÇÃO DOS ELEMENTOS: Os elementos de treliça são gerados de cima para baixo, seguindo a mesma ordem de geração dos nós. No programa GTEQ, os cabos são inclinados e seus comprimentos variam de acordo com a altura da torre, além disso, não são discretizados em vários elementos. Já no programa GTAU, os cabos são retos e discretizados em vários elementos, sendo este número e seus comprimentos definidos pelo usuário do programa. Primeiramente, são gerados os cabos pára-raios, em seguida, os cabos condutores.

TENSIONAMENTO DOS CABOS: No programa GTEQ, o comprimento de tensionamento dos elementos de cabo (vetor c da Figura 5.1) é determinado de forma aproximada em função das bitolas, da altura da torre e do ponto de ancoragem do cabo, de modo a atender o critério da norma canadense de torres CSA S37-94, segundo o qual a força de pré-tensionamento deve estar em torno de 10% da capacidade nominal do cabo. No programa GTAU, este comprimento é um parâmetro da entrada de dados definido pelo usuário do programa de forma a atender o critério da norma brasileira NBR 5422, segundo o qual, na hipótese de velocidade máxima do vento, o esforço de tração axial nos cabos não pode ser superior a 50% da carga de ruptura dos mesmos. Neste trabalho foi adotado um limite de 55%, sendo que o tensionamento final só será determinado de forma definitiva após a análise estática.

SAÍDA DE DADOS: Neste bloco do programa GTEQ são gerados dois arquivos de saída de dados, sendo um tipo “script” que poderá ser usado na visualização da estrutura no AutoCAD, e outro tipo “texto” que será usado como entrada de dados do programa de análise estática (AETEQ). Este último arquivo contém as propriedades mecânicas dos elementos, dados geométricos da estrutura e parâmetros de vento. No programa AETAU, o procedimento permanece inalterado, sendo que o arquivo de saída tipo “texto” será usado no programa AETAU.

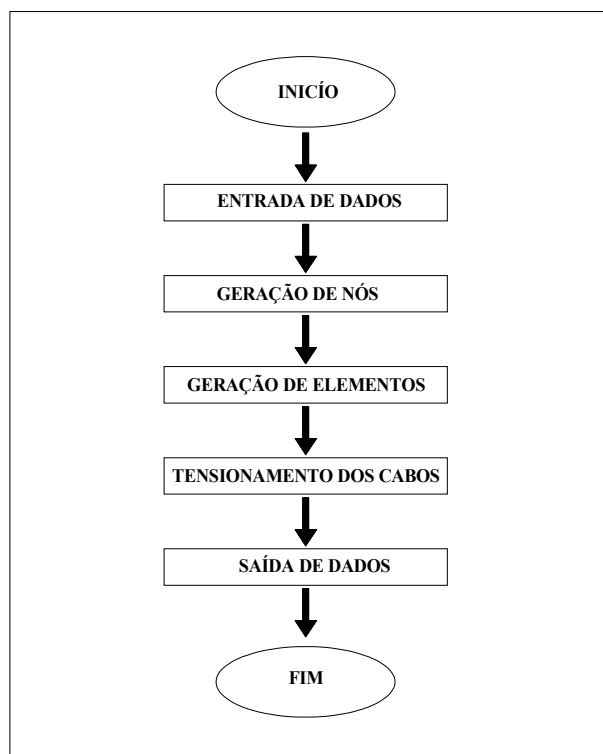


Figura 6.1 – Fluxograma do programa GTAU.

6.2 – PROGRAMA AETAU

O programa AETAU (Análise Estática de Torres Autoportantes) foi baseado no programa AETEQ (Análise Estática de Torres Estaiadas Quadradas) desenvolvido por Menin (2002), sendo permitido realizar dois tipos de análise:

1 – Análise estática sem vento: as tensões, deformações e deslocamentos dos elementos de treliças e cabos são calculados levando-se em consideração o carregamento devido ao peso próprio desses elementos.

2 – Análise estática com vento: as tensões, deformações e deslocamentos dos elementos de treliças e cabos são calculados quando a estrutura está submetida aos carregamentos devido ao peso próprio e de vento. O carregamento devido ao vento é calculado conforme as normas brasileiras NBR 6123 e NBR 5422. Além disso, as forças de pré-tensionamento dos cabos podem ser determinadas, mas, segundo a NBR 5422, não deverão ser superior a 50% da carga de ruptura dos mesmos.

O programa AETAU é composto por nove blocos principais, conforme mostra o fluxograma da figura 6.2. As diferenças entre os programas (AETEQ e AETAU) e as explicações referentes a cada um dos blocos do programa AETAU, serão apresentadas a seguir:

PROGRAMA PRINCIPAL: Neste bloco do programa AETAU é feita a leitura dos nomes dos arquivos de entrada e de saída de dados, além de ser feita a escolha do tipo de análise (1 – análise sem vento ou 2 – análise com vento). Na discretização dos elementos de cabos e barras foi utilizado o modelo não linear de cabo e não linear de treliça. Ainda nesta etapa, as variáveis são preparadas para a leitura e processamento de dados. Com o programa AETEQ também é permitido a escolha entre os dois tipos de análises, porém, também é permitida a escolha do modelo matemático a ser utilizado na discretização dos elementos de cabos ou barras, sendo eles: 1 – Modelo não linear de cabo e não linear de treliça (Pulino, 1991); 2 – Modelo linear de cabo e linear de treliça (Pulino, 1998); ou 3 – Modelo não linear de cabo (Pulino, 1991) e linear clássico de treliça (Gere e Weaver, 1987).

SETUP: Neste bloco do programa AETEQ é feita a leitura de dois arquivos do banco de dados, sendo que um deles contém as propriedades mecânicas e geométricas dos perfis (Perfil.aco) e o outro, as propriedades dos cabos (Cabo.aco). Logo após, é feita a leitura do arquivo de entrada de dados, gerado pelo programa GTEQ, que contém as informações necessárias para as próximas etapas do processamento, tais como: coordenadas nodais, número de nós e elementos, parâmetros utilizados na análise com vento, etc. Finalmente, os graus de liberdade da estrutura são reordenados, começando com os graus de liberdade livres (1, 2, ..., n), seguidos pelos restringidos (n+1, n+2, ..., ndf), onde n é o número de graus de liberdade livres e ndf é o número de graus restringidos da estrutura. No arquivo do banco de dados dos cabos (Cabo.aco) do programa AETAU foram acrescentadas as propriedades dos cabos condutores (Cabos de Aço com Alma de Alumínio), além disso, o arquivo de entrada de dados foi gerado pelo programa GTAU.

PESO PRÓPRIO: No programa AETEQ, após a leitura das bitolas dos elementos de cabos e barras que foram escolhidas no programa GTEQ em função da altura da torre, é feita a leitura do peso por unidade de comprimento de cada elemento (treliças e cabos) do banco de dados, em seguida é multiplicado pelos seus respectivos comprimentos, obtendo-

se o peso total do elemento. Assim, o peso é dividido por dois, de modo que seja distribuído para os nós da extremidade. Já no programa AETAU, as bitolas dos cabos e barras são definidas pelo usuário do programa no arquivo de entrada de dados, em seguida, o procedimento permanece inalterado.

VENTO: No programa AETEQ, este bloco é utilizado apenas para a análise com vento. Conforme a NBR 6123, a carga de vento na estrutura é calculada por trecho em função da classe (A, B ou C), entretanto, a carga de vento nos cabos não é calculada. Os eixos ortogonais X, Y e Z são pré-definidos, assim, o vento é definido como sendo frontal e atuando sempre na direção positiva de Z. Em seguida, esta força é dividida em duas parcelas, sendo uma aplicada na extremidade superior e a outra na extremidade inferior do trecho analisado, de acordo com o procedimento usado por Guimarães (2000). No programa AETAU, a carga de vento na torre é calculada segundo a NBR 6123, ou seja, da mesma forma que é feita no programa AETEQ. Já a carga de vento nos cabos é calculada conforme a NBR 5422, além disso, o vento atua na direção positiva de X.

QUASI-NEWTON: Nesta etapa do programa AETEQ, as configurações que representam uma posição de equilíbrio estático estável podem ser obtidas como pontos de mínimo local da função energia potencial total utilizando um algoritmo do tipo Quasi-Newton, onde uma aproximação para a inversa da matriz hessiana é feita com base na função energia potencial total e de seu gradiente, sendo calculada conforme um dos modelos escolhidos no início do programa. No programa AETAU, os cálculos são baseados no modelo não linear de cabo e não linear de treliça.

TRUSS DESIGN: Para os dois programas (AETEQ e AETAU), neste bloco são calculados os máximos esforços de tração e compressão nos perfis por *site* (ver capítulo 3), além disso, as capacidades resistentes à tração e compressão por *site* são determinadas com base no critério das Tensões Admissíveis – AISC. Por último, verificam-se os índices de esbeltez limites propostos pela norma canadense CSA S37-94.

CABLE DESIGN: No programa AETEQ são calculados os máximos esforços de tração atuantes nos elementos de cabo por *site*, sendo *site* definido como o conjunto de cabos com mesma altura de ancoragem ao longo do mastro da torre. No programa AETAU estes

mesmos esforços são calculados; entretanto, *site* é definido como o conjunto de cabos com mesma função (pára-raios ou condutores) e com mesmo vão.

REACTION: Neste bloco do programa AETEQ são calculadas as reações de apoio do mastro central da torre e das fundações laterais de ancoragem de cabos. É importante ressaltar que estes valores para um nó com grau de liberdade restringido em uma determinada direção no espaço corresponderá ao valor do gradiente da energia potencial total nesta direção. No programa AETAU são calculadas as reações de apoio da torre e as reações nos pontos extremos dos cabos.

SAÍDA DE DADOS: No programa AETEQ, este bloco é chamado de IMPRESSÃO onde são impressos dois arquivos de saída de dados. O primeiro com o nome “desloc.dat”, contendo somente os deslocamentos nodais da estrutura, já em formato compatível para ser utilizado nos programas de análise modal (FMVTEQ) e dinâmica (ADTEQ). O segundo arquivo corresponde ao memorial de cálculo da estrutura, onde são apresentados os resultados mais importantes da análise estática. Já no programa AETAU, neste bloco são gerados dois arquivos de saída de dados, sendo um deles com o nome “deform.dat”, contendo informações necessárias e em formato compatível para ser utilizado no programa GTAUDEF. E o segundo onde são apresentados os resultados da análise escolhida: com vento ou sem vento. Entre as informações geradas podemos destacar: deslocamentos nodais, tensões e deformações nos elementos de cabos e treliças, cargas nodais oriundas da atuação do vento, reações de apoio, etc.

No programa AETEQ é calculada a deflexão vertical da antena mais alta no bloco ROTATION, em seguida é comparada com os limites propostos no procedimento Telebrás para torres das classes TEB e TEC. Este bloco não é utilizado no caso de análise estática sem vento. Como as torres autoportantes não possuem antenas, este bloco foi excluído no programa AETAU.

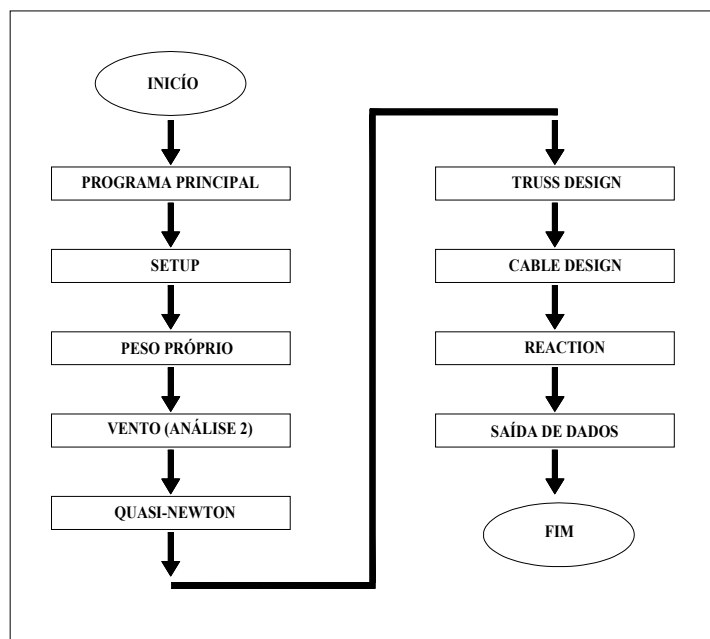


Figura 6.2 – Fluxograma do programa AETAU.

6.3 – PROGRAMA GTAUDEF

O programa GTAUDEF (Gerador de Torres Autoportantes Deformada) tem com função principal gerar a geometria deformada de torres autoportantes do tipo tronco-piramidal, ou seja, após a estrutura sofrer o efeito dos carregamentos nodais. Este programa é composto por três blocos principais, como mostra o fluxograma da figura 6.3, que serão descritos a seguir:

ENTRADA DE DADOS: Neste bloco é feita a leitura do arquivo tipo “texto” contendo alguns dados necessários para a geração da estrutura, tais como: número de nós, número total de elementos (treliças e cabos), coordenadas nodais considerando a estrutura deformada, etc.

GERAÇÃO DOS ELEMENTOS: Os elementos de treliça são gerados de cima para baixo e por subestrutura, seguindo a mesma ordem de geração do programa GTAU. Por último, são gerados os cabos (pára-raios e condutores).

SAÍDA DE DADOS: Neste bloco é gerado um arquivo de saída de dados do tipo “script”, que poderá ser usado na visualização da estrutura no AutoCAD.

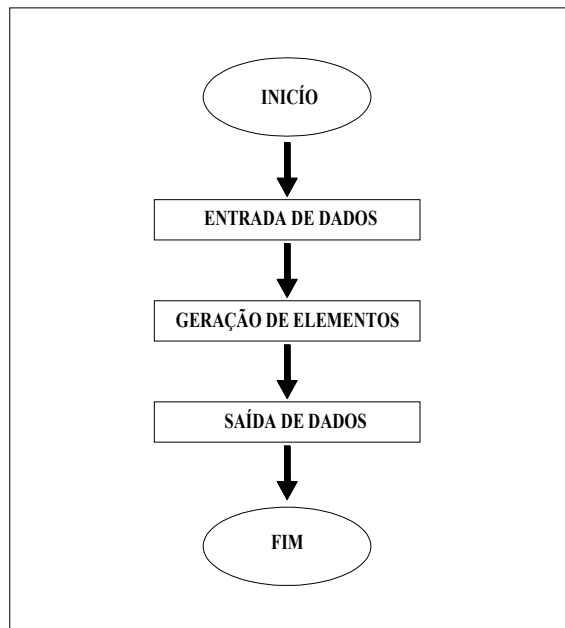


Figura 6.3 – Fluxograma do programa GTAUDEF.

7 – APLICAÇÕES NUMÉRICAS

Neste capítulo serão apresentadas as principais características dos modelos numéricos tais como: altura total da torre, quantidade dos cabos pára-raios e condutores, restrições nodais, parâmetros utilizados na análise estática com vento e definição dos eixos ortogonais (x, y e z). Também serão apresentados os resultados da análise estática sem vento e com vento.

Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados e a eficiência dos programas desenvolvidos, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados dos deslocamentos dos cabos, obtidos no programa AETAU, com a flecha obtida pela equação 3.5 (ver capítulo 3). Além disso, foram comparados os resultados dos esforços nos cabos, obtidos no programa AETAU, com os resultados obtidos com o programa de análise estrutural SAP2000 *Advanced* v. 12.0.0.

7.1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

As análises numéricas realizadas neste estudo correspondem a um trecho reto de uma linha de transmissão de alta tensão com suportes de mesma altura. Os elementos modelados e analisados são:

- Torre metálica treliçada autoportante tipo tronco-piramidal.
- Dois (02) vãos de cabos condutores, com seis (06) cabos por vão.
- Dois (02) vãos de cabos pára-raios, sendo dois (02) cabos por vão.

Neste caso, a torre autoportante tipo tronco-piramidal é utilizada como estrutura de suspensão de uma linha de transmissão de 138 kV. Trata-se de uma torre intermediária (B) de um trecho com dois vãos e três torres, conforme mostra a figura 7.1.

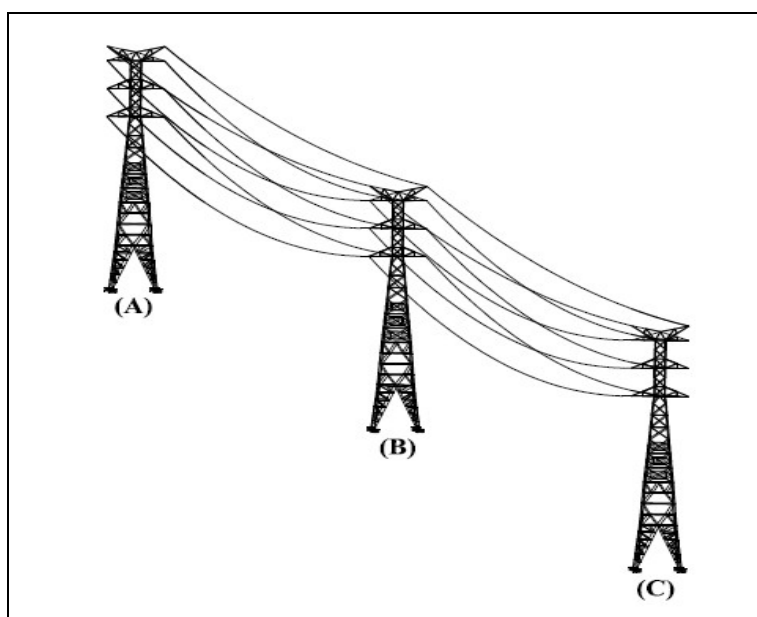


Figura 7.1 – Trecho de uma linha de transmissão com três torres autoportantes e dois vãos.

Neste trabalho, os modelos numéricos estudados diferem entre si pelo comprimento dos vãos, conseqüentemente pelo comprimento dos cabos. Dessa forma, os exemplos analisados foram classificados em dois grupos:

- Vãos iguais com: 50m, 150m, 250m, 350m, 400m e 500m.
- Vãos diferentes com: 50m e 150m, 70m e 125m, 180m e 220m, 260m e 310m, 350m e 400m.

Além disso, adotou-se um único modelo de torre, cujas alturas das subestruturas e altura total da torre são ilustradas na figura 7.2.

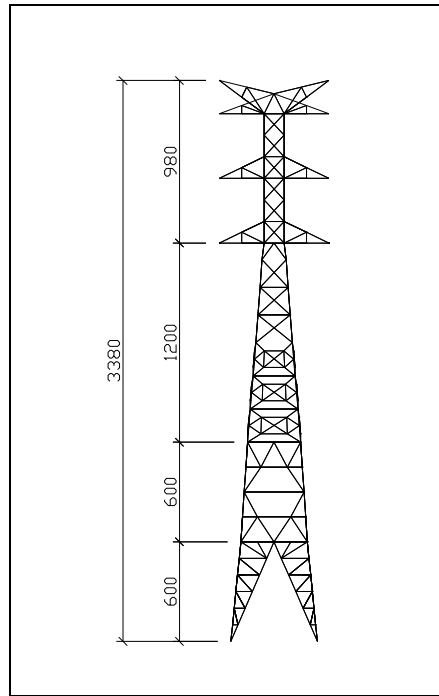


Figura 7.2 – Torre autoportante tipo tronco-piramidal (medidas em cm e sem escala).

As bitolas dos perfis que compõem as torres dos exemplos numéricos são apresentadas em função da estrutura, subestrutura e tipo da peça (montantes, horizontais, diagonais e travamentos), conforme é mostrado na tabela 7.1. As bitolas e os encurtamentos dos cabos (vetor c da Figura 5.1) são apresentados em função do *site* (ver capítulo 3), conforme modelo da tabela 7.2. É importante ressaltar que as bitolas nas tabelas correspondem às bitolas dos arquivos do banco de dados do apêndice A (Perfil.aco) e apêndice B (Cabo.aco), além disso, esses dados são escolhidos pelo usuário do programa. Os encurtamentos são utilizados para a introdução das forças de pré-tensionamento.

Tabela 7.1 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 350m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 14 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 7 | 7 | - |
| | Mísulas | - | 7 | 7 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela 7.2 – Bitolas e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 350m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) |
|-------------------|----------------|-------------|---------------------------|
| Pára-raios | 4 | 18 | 4,35 |
| | | 19 | 4,35 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,35 |
| | | 21 | 0,35 |
| | | 22 | 0,35 |
| | | 23 | 0,35 |
| | | 24 | 0,35 |
| | | 25 | 0,35 |

As bitolas dos cabos, os encurtamentos dos cabos e as bitolas dos perfis referentes aos outros exemplos são apresentados, respectivamente, nos apêndices C e D. Além disso, outras características dos modelos são apresentadas nas tabelas 7.3 e 7.4. É importante salientar que a estrutura é composta por 16 cabos (pára-raios e condutores), sendo que os nós das extremidades dos cabos não pertencentes à estrutura intermediária são considerados fixos, ou seja, não há deslocamentos em nenhuma direção nestes nós.

Tabela 7.3 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos com vãos iguais.

| | Vãos iguais (m) | | | | | |
|--------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 50 | 150 | 250 | 350 | 400 | 500 |
| NN | 593 | 593 | 593 | 593 | 785 | 913 |
| NTE | 870 | 870 | 870 | 870 | 870 | 870 |
| NCABO | 20 | 20 | 20 | 20 | 32 | 40 |
| NCE | 320 | 320 | 320 | 320 | 512 | 640 |

Tabela 7.4 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos com vãos diferentes.

| | Vãos diferentes (m) | | | | |
|--------------|----------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | 50 e 150 | 70 e 125 | 180 e 220 | 260 e 310 | 350 e 400 |
| NN | 593 | 673 | 593 | 673 | 673 |
| NTE | 870 | 870 | 870 | 870 | 870 |
| NCABO | 20 | 25 | 20 | 25 | 25 |
| NCE | 320 | 400 | 320 | 400 | 400 |

Sendo que:

NN : número total de nós;

NTE : número total de elementos de treliças;

NCABO : número de elementos considerando a discretização de um cabo;
 NCE : número total de elementos de cabos considerando a discretização de todos os cabos, ou seja, $NCE = 16 \cdot NCABO$.

Na análise estática com vento foram adotados os parâmetros especificados na tabela 7.5 sendo que não foram consideradas variações térmicas ($\Delta T = 0$). Como foi visto no capítulo 4, são definidas quatro categorias de terreno pela NBR 5422, entretanto, para a NBR 6123 o terreno é classificado em cinco categorias, cujas características serão apresentadas a seguir. Portanto, foi escolhida a categoria II para análise com vento nos perfis e categoria B para os cabos.

- **Categoria I:** superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- **Categoria II:** terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas;
- **Categoria III:** terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas;
- **Categoria IV:** terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada;
- **Categoria V:** terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

Tabela 7.5 – Parâmetros de vento conforme NBR 6123 e NBR 5422.

| | |
|--|--------|
| Velocidade básica do vento (V_0) | 45 m/s |
| Fator topográfico (S_1) | 1,0 |
| Fator estatístico (S_3) | 1,1 |
| Categoria do terreno (perfis) | II |
| Categoria do terreno (cabos) | B |

A força do vento foi considerada atuando na direção positiva de x, ou seja, perpendicular ao eixo longitudinal dos cabos. Os eixos ortogonais (x, y e z) são pré-definidos, conforme mostra a figura 7.3, de modo que o eixo y será o eixo vertical e os eixos x e z definem o plano em que se encontram as barras horizontais e o travamento interno.

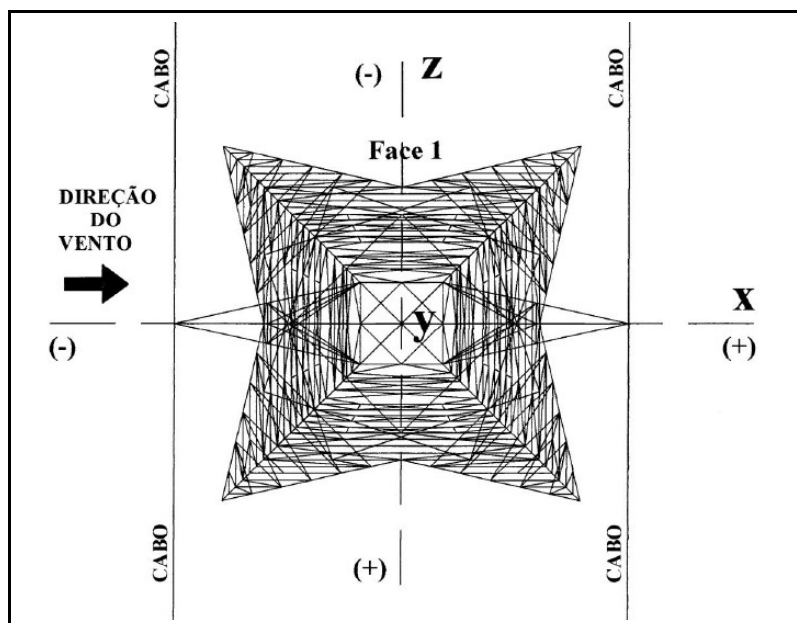


Figura 7.3 – Eixos ortogonais (x, y e z).

7.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho foram estudados seis (06) modelos numéricos com vãos iguais e cinco (05) com vãos diferentes, cujos principais resultados da análise estática sem vento e com vento serão descritos a seguir.

Para os modelos com vãos iguais, os resultados do número de iterações do procedimento Quasi-Newton, cujo objetivo é buscar a posição de equilíbrio estático estável da estrutura, são apresentados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos iguais.

| Modelos numéricos com vãos iguais | Número de iterações | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------|
| | Análise sem vento | Análise com vento |
| 50m | 1460 | 1470 |
| 150m | 2606 | 2511 |
| 250m | 3224 | 3243 |
| 350m | 3472 | 3710 |
| 400m | 3967 | 3948 |
| 500m | 4637 | 4674 |

Com os dados da tabela 7.6, construiu-se o gráfico da figura 7.4, onde se pode observar que, na maioria dos casos, houve um aumento do número de iterações na análise com vento quando comparada com a análise sem vento, sendo essas variações inferiores a 7%.

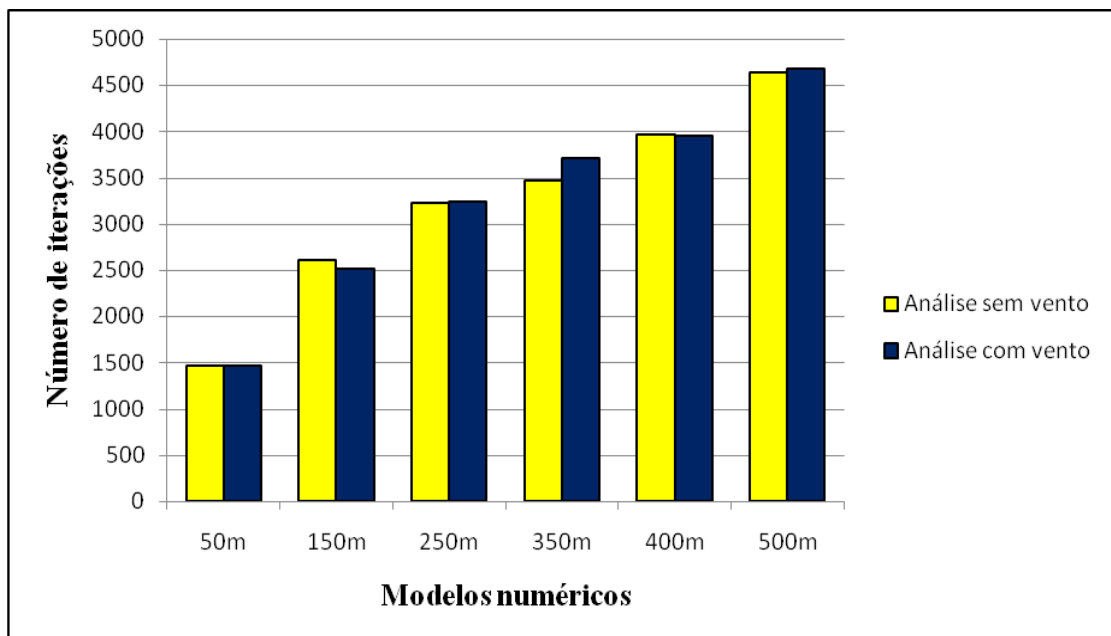


Figura 7.4 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos iguais.

Na tabela 7.7 são apresentados os resultados do tempo de processamento, em minutos e segundos, para os modelos com vãos iguais, utilizando-se um processador Intel (1,86 GHz).

Tabela 7.7 – Tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos iguais.

| Modelos numéricos com vãos iguais | Tempo de processamento | |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|
| | Análise sem vento | Análise com vento |
| 50m | 02' 28'' | 01' 54'' |
| 150m | 04' 38'' | 03' 17'' |
| 250m | 05' 59'' | 04' 14'' |
| 350m | 06' 31'' | 04' 56'' |
| 400m | 20' 35'' | 09' 01'' |
| 500m | 39' 25'' | 14' 17'' |

Na figura 7.5 é apresentado um gráfico comparativo do tempo de processamento entre a análise (estática) sem vento e com vento, tomando com referência o menor valor. As variações do tempo entre as duas análises foram menores que 10%, exceto para os maiores vãos (400m e 500m), cujo valor chegou a dobrar.

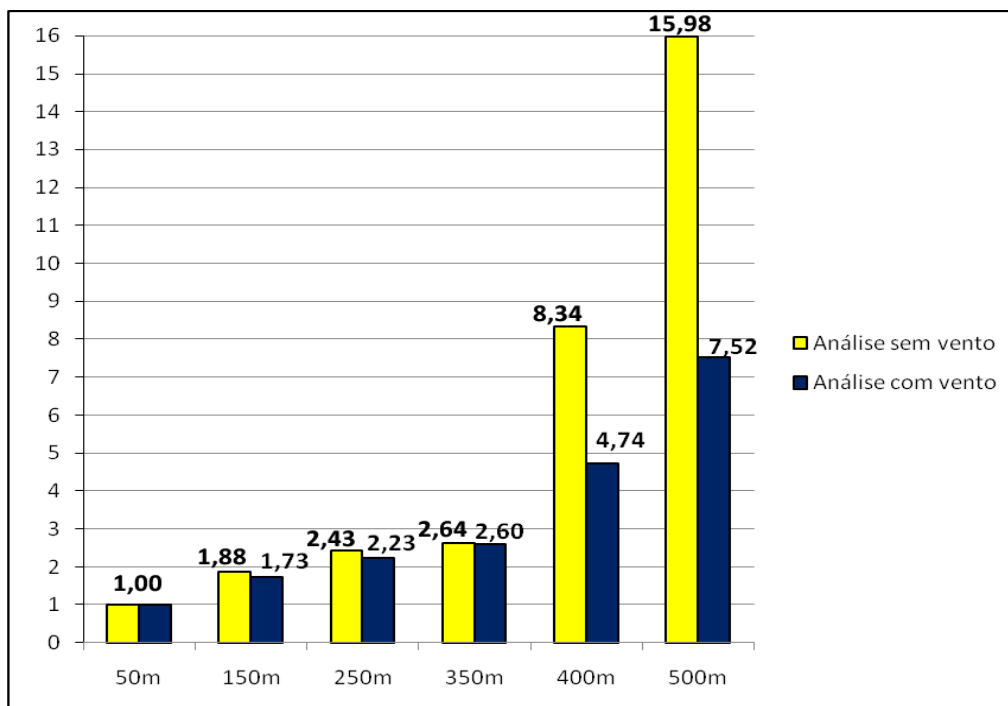


Figura 7.5 – Análise comparativa do tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos iguais.

Repetindo as mesmas análises para os modelos com vãos diferentes, os resultados do número de iterações podem ser observados na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos diferentes.

| Modelos numéricos com vãos diferentes | Número de iterações | |
|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
| | Análise sem vento | Análise com vento |
| 50m e 150m | 2811 | 2699 |
| 70m e 125m | 2958 | 2928 |
| 180m e 220m | 3359 | 3269 |
| 260m e 310m | 3813 | 3643 |
| 350m e 400m | 4088 | 3994 |

Observando o gráfico da figura 7.6, que foi construído a partir dos resultados da tabela 7.8, houve uma diminuição do número de iterações entre as duas análises, sendo as variações inferiores a 5%.

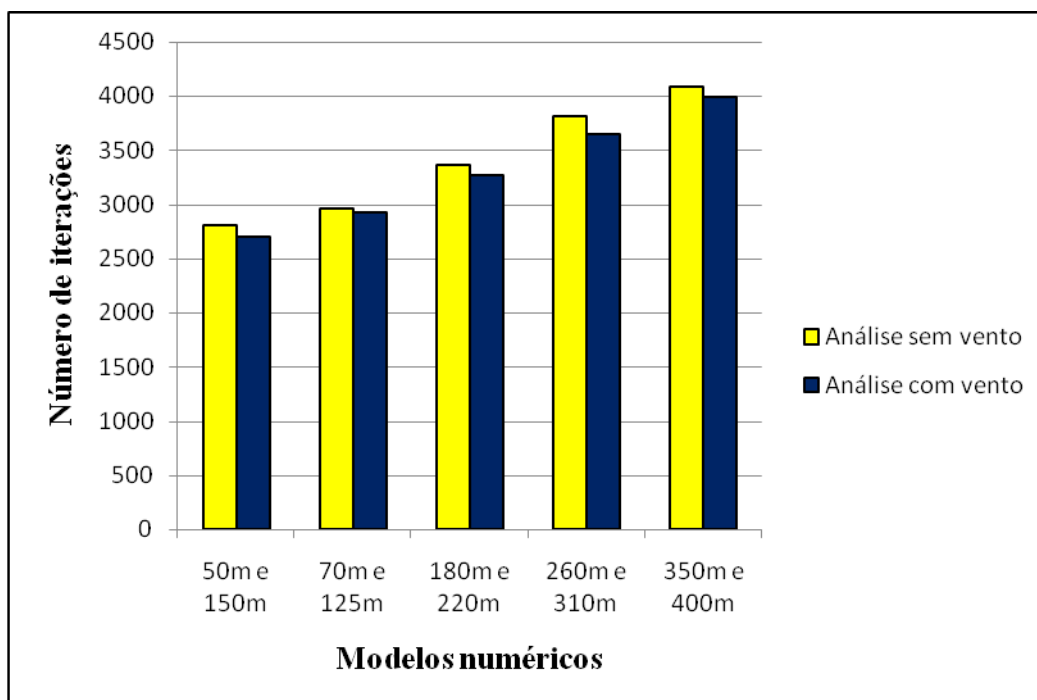


Figura 7.6 – Número de iterações dos modelos numéricos com vãos diferentes.

Na tabela 7.9 são apresentados os resultados do tempo de processamento para vãos diferentes, com estes dados, montou-se o gráfico comparativo da figura 7.7.

Tabela 7.9 – Tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos diferentes.

| Modelos numéricos com vãos diferentes | Tempo de processamento | |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|
| | Análise sem vento | Análise com vento |
| 50m e 150m | 04' 20'' | 03' 33'' |
| 70m e 125m | 06' 38'' | 05' 59'' |
| 180m e 220m | 05' 50'' | 04' 21'' |
| 260m e 310m | 10' 15'' | 06' 12'' |
| 350m e 400m | 11' 04'' | 06' 43'' |

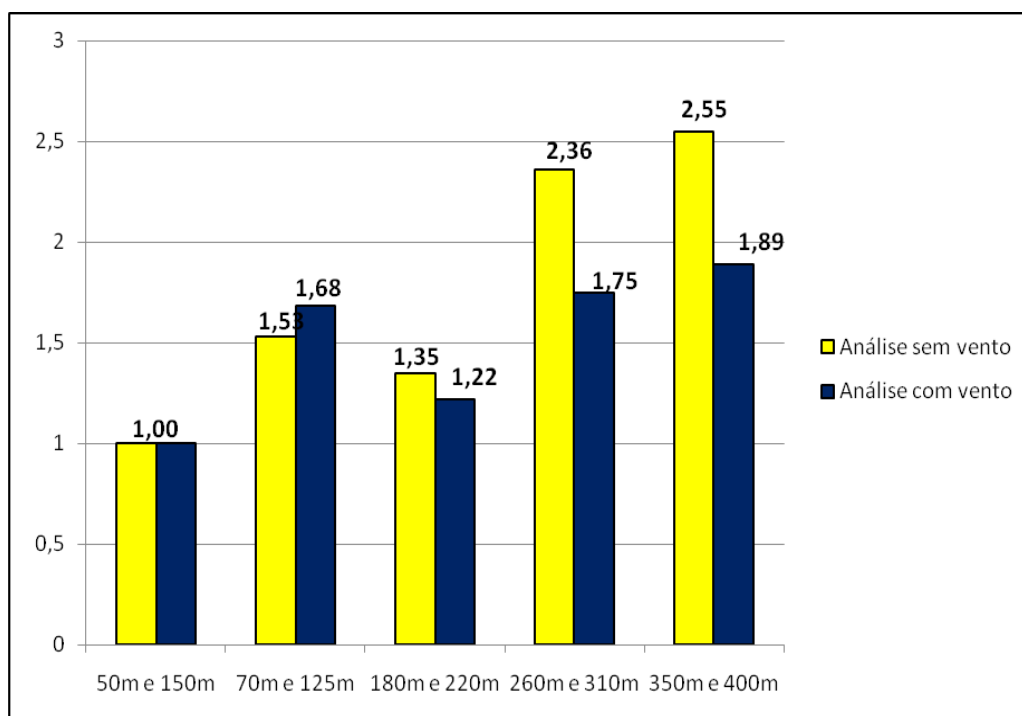


Figura 7.7 – Análise comparativa do tempo de processamento dos modelos numéricos com vãos diferentes.

No gráfico da figura 7.7, observa-se que tempo de processamento da análise sem vento é bem maior do que a análise com vento, chegando a variações de até 35%. Além disso, os maiores tempos e variações são observados nos modelos com maiores vãos.

Na tabela 7.10 são apresentadas as comparações entre os deslocamentos dos cabos, obtidos no programa AETAU, e as flechas obtidas através da equação 3.5 do capítulo 3. Estas comparações são referentes aos modelos numéricos com vão iguais.

Os valores dos deslocamentos do programa AETAU são os deslocamentos na direção y dos nós do meio dos vãos, além disso, os deslocamentos dos cabos condutores foram agrupados conforme a posição dos mesmos na estrutura, como mostra a figura 7.8. No

cálculo das flechas, através da equação da parábola, foram adotadas como valores de T_0 , as forças de pré-tensionamento obtidas no programa AETAU na análise sem vento.

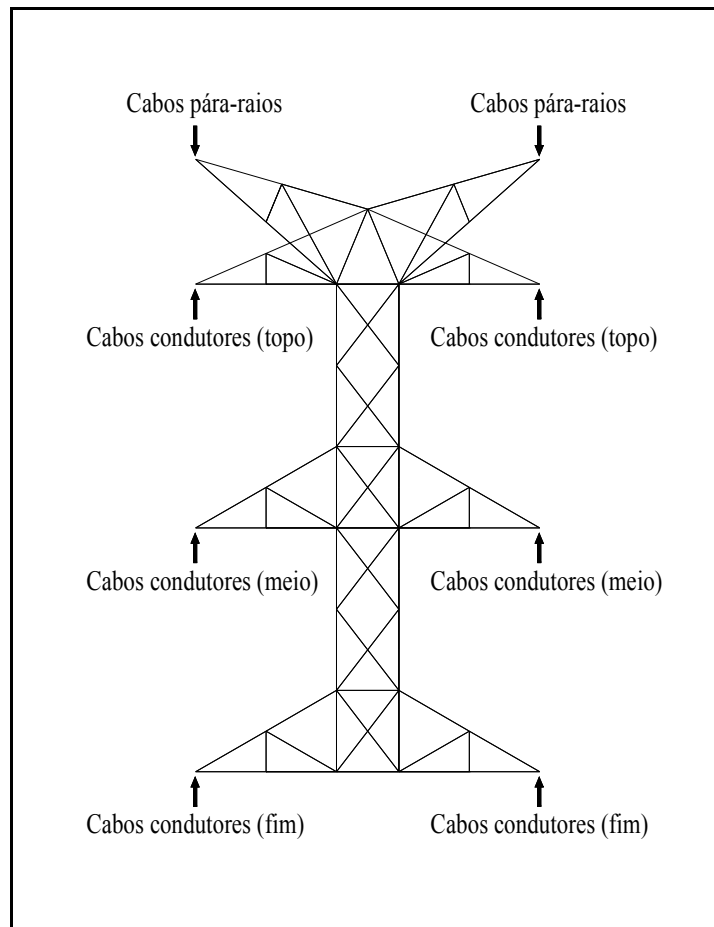


Figura 7.8 – Posição dos cabos (pára-raios e condutores) na torre.

Tabela 7.10 – Comparação entre os deslocamentos e flechas dos cabos (modelos numéricos com vãos iguais).

| | | Deslocamentos e flechas dos cabos (cm) | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Exemplos numéricos | | 50m | 150m | 250m | 350m | 400m | 500m | |
| Cabos pára-raios | AETAU | 6,09 | 52,11 | 150,10 | 279,14 | 269,89 | 403,40 | |
| | Equação | 5,98 | 51,86 | 149,77 | 278,57 | 268,61 | 402,13 | |
| | Diferença (cm e %) | | 0,11 | 0,25 | 0,33 | 0,57 | 1,28 | 1,27 |
| | | | 1,84% | 0,48% | 0,22% | 0,20% | 0,48% | 0,31% |
| Cabos condutores (topo) | AETAU | 13,59 | 99,64 | 276,00 | 477,14 | 500,24 | 681,28 | |
| | Equação | 13,49 | 99,37 | 275,40 | 476,09 | 499,04 | 680,04 | |
| | Diferença (cm e %) | | 0,10 | 0,27 | 0,60 | 1,05 | 1,20 | 1,24 |
| | | | 0,74% | 0,27% | 0,22% | 0,22% | 0,24% | 0,18% |
| Cabos condutores (meio) | AETAU | 13,56 | 99,64 | 275,95 | 477,00 | 500,02 | 681,15 | |
| | Equação | 13,49 | 99,35 | 275,45 | 476,09 | 499,11 | 680,04 | |
| | Diferença (cm e %) | | 0,07 | 0,29 | 0,50 | 0,91 | 0,91 | 1,11 |
| | | | 0,52% | 0,29% | 0,18% | 0,19% | 0,18% | 0,16% |
| Cabos condutores (fim) | AETAU | 13,56 | 99,68 | 276,07 | 476,97 | 500,09 | 681,15 | |
| | Equação | 13,49 | 99,35 | 275,50 | 476,09 | 499,04 | 680,04 | |
| | Diferença (cm e %) | | 0,07 | 0,33 | 0,57 | 0,88 | 1,05 | 1,11 |
| | | | 0,52% | 0,33% | 0,21% | 0,18% | 0,21% | 0,16% |

De acordo com os dados das tabelas 7.10, observa-se que para os exemplos com vãos maiores que 100m, os valores dos deslocamentos obtidos com o programa AETAU apresentaram-se muito próximos das flechas calculadas pela equação da parábola apresentando uma diferença limite menor que 0,50%. Para o exemplo com vãos de 50m, essa diferença foi de 1,84%, permanecendo dentro de um limite aceitável.

Para os modelos com vãos diferentes foram realizadas as mesmas comparações cujos valores são apresentados na tabela 7.11. Os cabos também foram agrupados de acordo com a posição na estrutura, obedecendo à mesma ordem da figura 7.8. Além disso, foram classificados de acordo com o *site*. Os cabos com vãos menores são representados pelos *sites* pares (18, 20, 22 e 24) e com vãos maiores pelos *sites* ímpares (19, 21, 23 e 25).

Tabela 7.11 – Comparação entre os deslocamentos e flechas dos cabos (modelos numéricos com vãos diferentes).

| | | Deslocamentos e flechas dos cabos (cm) | | | | | |
|-------------------------|------|--|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | Site | Exemplos numéricos | 50m e 150m | 70m e 125m | 180m e 220m | 260m e 310m | 350m e 400m |
| Cabos pára-raios | 18 | AETAU | 5,37 | 9,52 | 88,54 | 129,13 | 246,71 |
| | | Equação | 5,44 | 9,38 | 87,34 | 128,21 | 245,54 |
| | | Diferença (cm e %) | -0,07 | 0,14 | 1,20 | 0,92 | 1,17 |
| | | | 1,30% | 1,49% | 1,37% | 0,72% | 0,48% |
| | 19 | AETAU | 55,19 | 27,77 | 117,51 | 172,12 | 295,84 |
| | | Equação | 54,96 | 27,63 | 117,93 | 172,76 | 296,67 |
| Diferença (cm e %) | | 0,23 | 0,14 | -0,42 | -0,64 | -0,83 | |
| | | 0,42% | 0,51% | 0,36% | 0,37% | 0,28% | |
| Cabos condutores (topo) | 20 | AETAU | 12,33 | 19,24 | 147,05 | 265,22 | 386,06 |
| | | Equação | 12,11 | 17,86 | 146,71 | 265,03 | 385,84 |
| | | Diferença (cm e %) | 0,22 | 1,38 | 0,94 | 0,19 | 0,22 |
| | | | 1,82% | 7,73% | 0,23% | 0,07% | 0,06% |
| | 21 | AETAU | 103,42 | 63,22 | 226,41 | 383,25 | 514,64 |
| | | Equação | 103,34 | 58,95 | 225,92 | 383,30 | 514,32 |
| Diferença (cm e %) | | 0,08 | 4,27 | 0,49 | -0,05 | 0,32 | |
| | | 0,08% | 7,24% | 0,22% | 0,01% | 0,06% | |
| Cabos condutores (meio) | 22 | AETAU | 11,63 | 19,41 | 149,11 | 267,14 | 388,27 |
| | | Equação | 11,53 | 18,04 | 148,92 | 267,08 | 388,03 |
| | | Diferença (cm e %) | 0,10 | 1,37 | 0,19 | 0,06 | 0,24 |
| | | | 0,87% | 7,59% | 0,13% | 0,02% | 0,06% |
| | 23 | AETAU | 104,68 | 62,83 | 224,04 | 381,22 | 512,21 |
| | | Equação | 104,48 | 58,65 | 223,69 | 381,03 | 512,00 |
| Diferença (cm e %) | | 0,20 | 4,18 | 0,35 | 0,19 | 0,21 | |
| | | 0,19% | 7,13% | 0,16% | 0,05% | 0,04% | |
| Cabos condutores (fim) | 24 | AETAU | 11,09 | 19,57 | 150,96 | 268,68 | 389,85 |
| | | Equação | 11,07 | 18,14 | 150,61 | 268,67 | 389,45 |
| | | Diferença (cm e %) | 0,02 | 1,43 | 0,35 | 0,01 | 0,40 |
| | | | 0,18% | 7,88% | 0,23% | 0,00% | 0,10% |
| | 25 | AETAU | 105,72 | 62,54 | 222,25 | 379,63 | 510,72 |
| | | Equação | 105,55 | 58,51 | 221,94 | 379,62 | 510,45 |
| Diferença (cm e %) | | 0,17 | 4,03 | 0,31 | 0,01 | 0,27 | |
| | | 0,16% | 6,89% | 0,14% | 0,00% | 0,05% | |

Da tabela 7.11, observa-se que para os exemplos com vãos diferentes, os valores dos deslocamentos obtidos com o programa AETAU apresentaram-se muito próximos das flechas calculadas pela equação da parábola apresentando uma diferença limite menor que 7,88%.

Os resultados dos esforços axiais nos cabos para vãos iguais de 350m e vãos diferentes de 260m e 310m são mostrados, respectivamente, nas tabelas 7.12 e 7.13. Estes resultados foram obtidos pelo programa AETAU, além disso, no caso de análise com vento são apresentadas as porcentagens destes esforços em relação à carga de ruptura. Os resultados dos esforços nos cabos referentes aos outros exemplos numéricos são apresentados no apêndice D.

Tabela 7.12 – Esforços nos cabos obtidos pelo programa AETAU para vãos iguais de 350m.

| Função | Site | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|------|-------------------|-------------------|---------|
| | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 18 | 21,872 | 21,931 | 32,02 |
| | 19 | 21,872 | 21,921 | 32,00 |
| Condutores | 20 | 57,578 | 57,902 | 38,02 |
| | 21 | 57,578 | 57,912 | 38,03 |
| | 22 | 57,588 | 57,882 | 38,00 |
| | 23 | 57,578 | 57,872 | 37,99 |
| | 24 | 57,578 | 57,863 | 37,99 |
| | 25 | 57,578 | 57,833 | 37,97 |

Tabela 7.13 – Esforços nos cabos obtidos pelo programa AETAU para vãos diferentes de 260m e 310m.

| Função | Site | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|------|-------------------|-------------------|---------|
| | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 18 | 26,225 | 26,274 | 38,36 |
| | 19 | 27,667 | 27,686 | 40,42 |
| Condutores | 20 | 58,608 | 58,892 | 42,79 |
| | 21 | 57,608 | 57,902 | 42,07 |
| | 22 | 58,157 | 58,461 | 42,47 |
| | 23 | 57,951 | 58,265 | 42,33 |
| | 24 | 57,814 | 58,137 | 42,24 |
| | 25 | 58,167 | 58,431 | 42,45 |

As forças máximas de tração e compressão nos perfis, obtidos através do programa AETAU, são indicadas segundo a estrutura, subestrutura, *site*, tipo e análise (sem vento ou

com vento), conforme é apresentado nas tabelas 7.14 e 7.15, sendo que estes resultados são referentes aos exemplos com vãos iguais de 350m e vãos diferentes de 260m e 310m, respectivamente. As forças nos perfis referentes aos outros exemplos são apresentadas no apêndice E.

Tabela 7.14 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 350m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -9,833 | 10,667 | -22,725 |
| | | 2 | H | 9,627 | -6,559 | 9,578 | -6,853 |
| | | 3 | D | 2,206 | -6,480 | 4,520 | -9,774 |
| | | 4 | T | 0,000 | -1,294 | 0,196 | -1,372 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -8,902 | 0,001 | -9,814 |
| | | 6 | D | 18,725 | -1,882 | 18,745 | -2,088 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -18,147 | 6,755 | -40,392 |
| | | 8 | D | 1,951 | -14,078 | 7,412 | -34,441 |
| | | 9 | T | 0,961 | -0,235 | 1,363 | -0,402 |
| | Extensão | 10 | M | 0,294 | -17,490 | 6,382 | -38,363 |
| | | 11 | H | 3,627 | -7,657 | 15,020 | -12,186 |
| | | 12 | D | 0,372 | -2,912 | 24,225 | -15,167 |
| | | 13 | T | 12,676 | -5,225 | 13,255 | -20,569 |
| | Pernas | 14 | M | 0,274 | -25,029 | 36,304 | -60,549 |
| | | 15 | H | 0,353 | -0,304 | 5,274 | -3,421 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,186 | 3,637 | -0,18 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,274 | -4,539 |

Tabela 7.15 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 260m e 310m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,912 | -12,578 | 12,941 | -23,980 |
| | | 2 | H | 8,549 | -6,382 | 8,539 | -6,608 |
| | | 3 | D | 2,000 | -6,657 | 4,167 | -9,000 |
| | | 4 | T | 0,000 | -1,069 | 0,225 | -1,196 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -9,755 | 0,000 | -10,569 |
| | | 6 | D | 15,725 | -5,637 | 15,735 | -5,725 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -20,245 | 10,127 | -39,137 |
| | | 8 | D | 2,520 | -16,549 | 10,421 | -33,696 |
| | | 9 | T | 0,863 | -0,245 | 1,794 | -0,490 |
| | Extensão | 10 | M | 0,559 | -19,647 | 8,774 | -37,353 |
| | | 11 | H | 3,451 | -7,627 | 15,872 | -13,118 |
| | | 12 | D | 0,333 | -2,814 | 27,657 | -16,216 |
| | | 13 | T | 12,686 | -4,970 | 13,294 | -21,784 |
| | Pernas | 14 | M | 0,510 | -27,245 | 38,892 | -60,020 |
| | | 15 | H | 0,421 | -0,304 | 5,843 | -3,441 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,186 | 3,647 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,274 | -4,54 |

Os resultados das reações de apoio, obtidos através do programa AETAU, são mostrados nas tabelas 7.16 e 7.17. Estes resultados são referentes aos exemplos com vãos iguais de 50m e vãos diferentes de 260m e 310m, respectivamente. Os resultados referentes aos outros exemplos numéricos são apresentados no apêndice F.

Tabela 7.16 – Reações de apoio para vãos iguais de 350m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,510 | 24,774 | 2,480 | -10,167 | -10,343 | -11,706 |
| | 195 | -2,520 | 24,627 | 2,500 | -5,970 | 59,696 | 6,137 |
| | 196 | -2,510 | 24,667 | -2,500 | -6,000 | 59,745 | -6,029 |
| | 197 | 2,510 | 24,755 | -2,480 | -9,951 | -10,284 | 11,569 |
| Extremidades dos cabos | 293 | 0,000 | 0,657 | 21,863 | -0,127 | 0,657 | 21,902 |
| | 313 | 0,000 | 0,657 | -21,863 | -0,127 | 0,657 | -21,902 |
| | 333 | -0,000 | 0,667 | 21,863 | -0,127 | 0,647 | 21,922 |
| | 353 | -0,000 | 0,667 | -21,863 | -0,127 | 0,647 | -21,902 |
| | 373 | -0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,402 | 2,980 | 57,823 |
| | 393 | -0,000 | 2,980 | -57,500 | -0,402 | 2,980 | -57,833 |
| | 413 | 0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,402 | 2,980 | 57,804 |
| | 433 | 0,000 | 2,980 | -57,500 | -0,402 | 2,980 | -57,823 |
| | 453 | -0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,392 | 2,980 | 57,804 |
| | 473 | -0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,392 | 2,970 | -57,794 |
| | 493 | 0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,392 | 2,980 | 57,755 |
| | 513 | 0,000 | 2,980 | -57,500 | -0,392 | 2,980 | -57,774 |
| | 533 | -0,000 | 2,980 | 57,490 | -0,382 | 2,980 | 57,755 |
| | 553 | -0,000 | 2,980 | -57,490 | -0,382 | 2,970 | -57,725 |
| | 573 | 0,000 | 2,980 | 57,500 | -0,382 | 2,980 | 57,774 |
| 593 | 0,000 | 2,980 | -57,500 | -0,382 | 2,980 | -57,764 | |

Tabela 7.17 – Reações de apoio para vãos diferentes de 260m e 310m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,755 | 26,921 | 2,647 | -8,265 | -4,294 | -11,725 |
| | 195 | -2,647 | 26,304 | 2,559 | -6,098 | 56,569 | 4,500 |
| | 196 | -2,049 | 19,637 | -2,108 | -7,902 | 53,323 | -4,745 |
| | 197 | 1,941 | 19,274 | -2,010 | -8,294 | -13,461 | 12,882 |
| Extremidades dos cabos | 298 | 0,000 | 0,500 | 26,225 | -0,098 | 0,500 | 26,265 |
| | 323 | 0,000 | 0,588 | -27,667 | -0,118 | 0,588 | 27,667 |
| | 348 | 0,000 | 0,500 | 26,216 | -0,098 | 0,500 | 26,255 |
| | 373 | -0,000 | 0,588 | -27,667 | -0,118 | 0,588 | 27,677 |
| | 398 | -0,000 | 2,294 | 58,559 | -0,323 | 2,294 | 58,843 |
| | 423 | -0,000 | 2,735 | -57,549 | -0,382 | 2,745 | 57,833 |
| | 448 | 0,000 | 2,294 | 58,549 | -0,323 | 2,294 | 58,784 |
| | 473 | 0,000 | 2,735 | -57,539 | -0,382 | 2,735 | 57,804 |
| | 498 | -0,000 | 2,294 | 58,108 | -0,314 | 2,294 | 58,412 |
| | 523 | -0,000 | 2,735 | 57,882 | -0,372 | 2,735 | 58,098 |
| | 548 | 0,000 | 2,294 | 58,088 | -0,314 | 2,294 | 58,372 |
| | 573 | -0,000 | 2,735 | 57,872 | -0,372 | 2,735 | 58,196 |
| | 598 | -0,000 | 2,294 | 57,765 | -0,304 | 2,294 | 58,088 |
| | 623 | -0,000 | 2,735 | -58,088 | -0,353 | 2,735 | 58,294 |
| 648 | 0,000 | 2,294 | 57,765 | -0,304 | 2,294 | 58,010 | |
| 673 | 0,000 | 2,735 | -58,098 | -0,353 | 2,735 | 58,363 | |

Conforme comentado anteriormente, com o objetivo de verificar a eficiência dos programas desenvolvidos nesse trabalho, os resultados dos esforços nos cabos, obtidos através do programa AETAU, foram comparados com os resultados obtidos pelo programa SAP2000, conforme mostra a tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Comparações entre os esforços nos cabos do programa AETAU e SAP2000 para vãos iguais de 350m.

| Função | Site | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------|------|-------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | AETAU | SAP2000 | Diferença (kN e %) | AETAU | SAP2000 | Diferença (kN e %) |
| Pára-raios | 18 | 21,872 | 21,872 | 0,000 | 21,921 | 21,921 | 0,000 |
| | | | | 0,00% | | | 0,00% |
| | 19 | 21,872 | 21,872 | 0,000 | 21,921 | 21,921 | 0,000 |
| | | | | 0,00% | | | 0,00% |
| Condutores | 20 | 57,578 | 57,576 | 0,002 | 57,872 | 58,248 | -0,376 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |
| | 21 | 57,578 | 57,580 | -0,002 | 57,882 | 58,257 | -0,375 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |
| | 22 | 57,588 | 57,586 | 0,002 | 57,872 | 58,248 | -0,376 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |
| | 23 | 57,578 | 57,580 | -0,002 | 57,872 | 58,248 | -0,376 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |
| | 24 | 57,578 | 57,577 | 0,001 | 57,853 | 58,230 | -0,377 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |
| | 25 | 57,578 | 57,579 | -0,001 | 57,853 | 58,230 | -0,377 |
| | | | | 0,00% | | | 0,65% |

De acordo com a tabela 7.18, pode-se observar que os valores dos esforços de pré-tensionamento dos cabos gerados pelo programas AETAU apresentaram-se muito próximos dos resultados obtidos com o programa SAP2000. As variações entre os resultados foram menores que 1%, mostrando-se satisfatória.

Na figura 7.9 são apresentadas as configurações indeformada e deformada da estrutura (torre e cabos) utilizada nos exemplos numéricos deste trabalho. A configuração indeformada é gerada pelo programa GTAU (Gerador de Torres Autoportantes), neste caso, os cabos são elementos retos. Após a análise (sem vento ou com vento) realizada pelo programa AETAU (Análise Estática de Torres Autoportantes), a estrutura deformada é obtida a partir do arquivo de saída (deform.dat) do programa AETAU, destacando-se a catenária desenvolvida pelos cabos. Em ambos os casos, as estruturas são geradas com o auxílio do programa comercial AutoCAD.

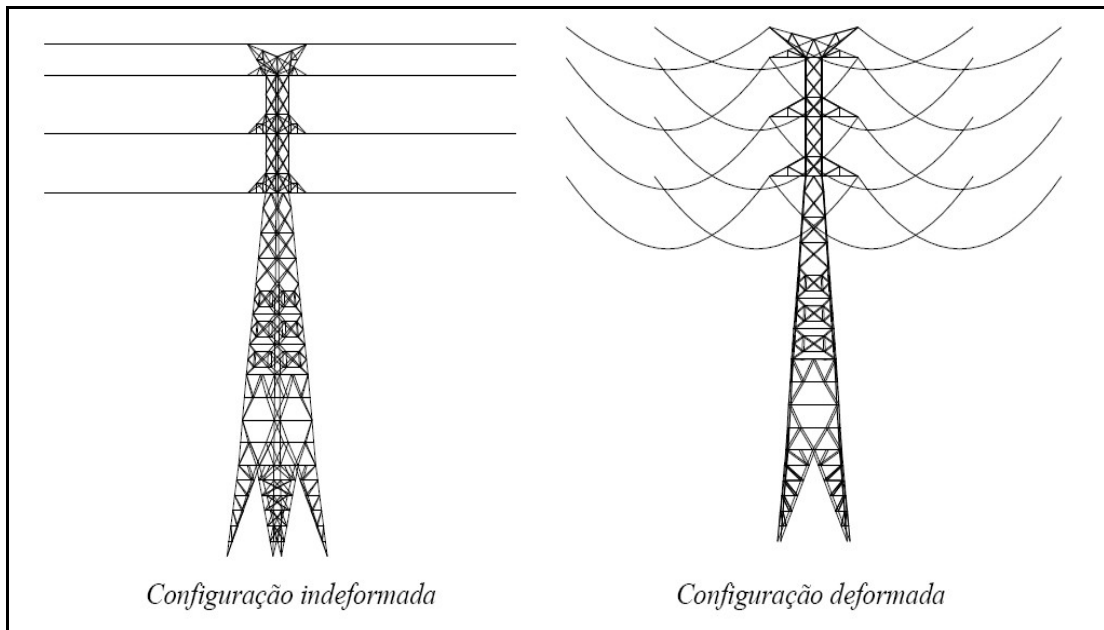


Figura 7.9 – Configuração indeformada e deformada da torre e dos cabos.

Na análise com vento, os efeitos da força do vento e do peso dos condutores estão atuando simultaneamente, assim, a catenária desenvolvida pelo cabo encontra-se em um plano inclinado em relação ao plano vertical que passa pela torre. Na figura 7.10 é mostrada essa configuração para o modelo com vãos iguais de 250m.

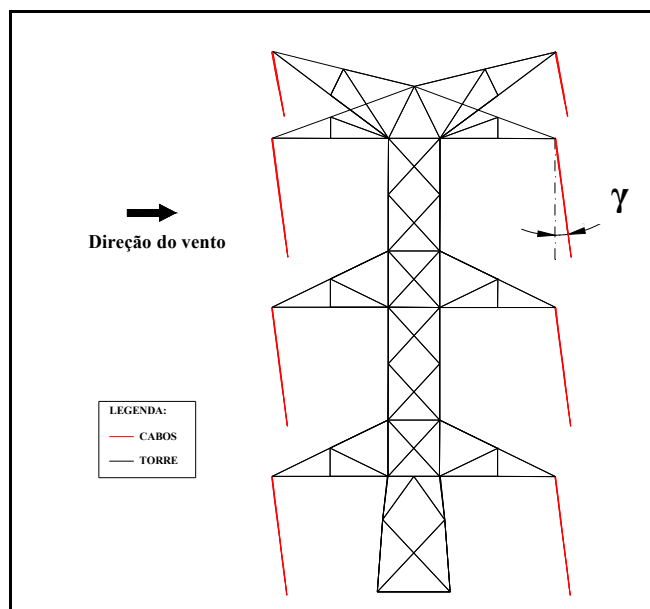


Figura 7.10 – Configuração deformada do cabo (análise com vento).

Na tabela 7.19 são apresentados os deslocamentos dos nós dos pára-raios e da mísula do topo da estrutura, cuja localização pode ser observada na figura 7.11. Estes valores foram

obtidos após as análises sem vento e com vento do programa AETAU para o caso de vãos iguais com 350m.

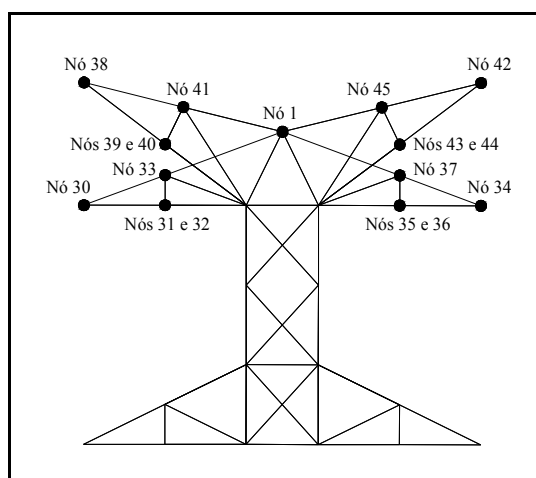


Figura 7.11 – Localização dos nós dos pára-raios e mísulas do topo da estrutura.

Tabela 7.19 – Deslocamentos dos nós dos pára-raios e mísulas para vãos iguais de 350m.

| Nós | Deslocamentos (análise sem vento) | | | Deslocamentos (análise com vento) | | |
|-----|-----------------------------------|---------|---------|-----------------------------------|---------|---------|
| | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) |
| 1 | -0,0055 | -0,2338 | -0,0003 | 2,8998 | -0,3082 | -0,0061 |
| 30 | 0,0482 | -0,7330 | 0,0093 | 2,7425 | -0,2284 | 0,0085 |
| 31 | 0,0288 | -0,3608 | 0,0293 | 2,7224 | -0,0899 | 0,0303 |
| 32 | 0,0200 | -0,3320 | 0,0293 | 2,7129 | -0,0565 | 0,0302 |
| 33 | -0,0409 | -0,3464 | 0,0057 | 2,7381 | -0,0731 | 0,0030 |
| 34 | -0,0652 | -0,7492 | -0,0093 | 2,6258 | -1,4086 | -0,0175 |
| 35 | -0,0370 | -0,3418 | -0,0290 | 2,6530 | -0,7660 | -0,0328 |
| 36 | -0,0458 | -0,3701 | -0,0290 | 2,6456 | -0,7916 | -0,0329 |
| 37 | 0,0263 | -0,3559 | -0,0058 | 2,8043 | -0,7790 | -0,0119 |
| 38 | -0,0350 | -0,2944 | 0,0087 | 3,0197 | 0,2286 | 0,0036 |
| 39 | -0,0029 | -0,2388 | -0,0003 | 2,8657 | 0,0334 | -0,0033 |
| 40 | -0,0022 | -0,2432 | -0,0003 | 2,8670 | 0,0308 | -0,0033 |
| 41 | -0,0114 | -0,2365 | 0,0040 | 2,9666 | -0,0175 | -0,0012 |
| 42 | 0,0210 | -0,3016 | -0,0096 | 3,0730 | -0,9727 | -0,0188 |
| 43 | -0,0109 | -0,2483 | -0,0115 | 2,8570 | -0,6716 | -0,0191 |
| 44 | -0,0083 | -0,2529 | -0,0115 | 2,8601 | -0,6754 | -0,0191 |
| 45 | 0,0024 | -0,2445 | -0,0055 | 2,9801 | -0,6133 | -0,0136 |

Conforme os dados da tabela 7.19, pode-se notar que os maiores deslocamentos da análise sem vento foram obtidos na direção Y, ou seja, onde atua o peso próprio. No caso da análise com vento, os maiores valores foram na direção X, ou seja, na direção do carregamento do vento. Além disso, os deslocamentos nodais são muito pequenos, dessa

forma, é necessário o uso do AutoCAD para a visualização da configuração deformada da torre.

8 – CONCLUSÕES

8.1 – CONCLUSÕES FINAIS

Na análise estática, verificou-se que as bitolas e a correta posição dos elementos de treliças interferem diretamente na busca da posição do equilíbrio estático da estrutura.

Observou-se que, na maioria dos exemplos analisados para vãos iguais, ocorreu um aumento do número de iterações na análise com o carregamento de vento proposto pela NBR 6123 e NBR 5422, ao ser comparado com a análise sem vento, utilizada apenas para determinar as forças de pré-tensionamento iniciais nos cabos. Além disso, os maiores valores do número de iterações ocorreram nos modelos com vãos maiores, provavelmente devido ao aumento do número de elementos utilizados na discretização dos cabos. Já para os exemplos com vãos diferentes, o número de iterações da análise sem vento foi maior quando comparado com os valores da análise com vento.

As maiores variações do tempo de processamento foram obtidas nos modelos com vãos diferentes, cujos valores foram de até 35%, enquanto que para os modelos com vãos iguais, esses valores foram inferiores a 10%, exceto para os maiores vãos.

Os valores dos deslocamentos dos nós do meio do vão não apresentaram variações significativas entre o programa AETAU e a equação da flecha baseada na equação da parábola. As menores variações obtidas entre os dois resultados foram para o caso de vãos iguais, cujos valores não ultrapassaram 2%. Para o caso de vão diferentes, este valor foi de 8%, mostrando-se satisfatórias para ambos os casos.

A partir da análise comparativa entre os esforços nos cabos do programa AETAU e SAP2000, observa-se que as diferenças entre os resultados não foram significativas. Concluindo-se, portanto, que o programa AETAU foi capaz de simular o comportamento dos cabos quando submetidos aos carregamentos de vento e peso próprio.

Os resultados dos esforços nos perfis para todos os modelos analisados mostraram que na análise sem vento os maiores esforços de tração foram obtidos nas horizontais do tronco da

cabeça, nas diagonais das mísulas e pára-raios e nos travamentos da extensão. Já os maiores esforços de compressão atuam nos montantes de toda a estrutura.

Na análise com vento, os maiores esforços de tração foram obtidos nas diagonais das mísulas e pára-raios, nas diagonais da extensão e nos montantes das pernas. Para os esforços de compressão, os maiores valores encontrados foram nos montantes de toda a estrutura, nas diagonais do tronco e nos travamentos da extensão.

A partir dos resultados das reações de apoio nos montantes da torre, observa-se que os maiores valores são referentes aos nós situados a barlavento. Essas reações são esforços de tração que podem causar o arrancamento da estrutura.

No caso da configuração deformada dos cabos, verificou-se que houve uma boa concordância entre o resultado obtido pelo programa GTAUDEF e a configuração encontrada na literatura.

8.2 – SUGESTÕES

Algumas sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas a seguir:

- Considerar o efeito da variação da temperatura na análise estática das torres autoportantes;
- Elaborar programas de análise dinâmica para torres autoportantes tipo tronco-piramidal;
- Aplicar os programas desenvolvidos neste trabalho para outros comprimentos de vãos e suportes com alturas diferentes;
- Desenvolver programas utilizando a mesma linguagem deste trabalho para torres com outro formato, por exemplo, torre delta;
- Estudar o comportamento da estrutura considerando a ruptura de cabos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS, < Disponível em <http://www.agenciadenoticias.pr.gov.br/modules/news/article.php?storyid=15318>, 2005.

American Institute of Steel Construction – AISC, “Manual of Steel Construction – Allowable Stress Design”, 9th Edition, Chicago, 1989.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações”, Rio de Janeiro, 1988.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica”, Rio de Janeiro, 1985.

BAYAR, J. C., “Drag Coefficients of Latticed Towers”, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 417-430, vol. 112, nº 02, fevereiro de 1986.

BLESSMANN, J, “Forças devidas ao vento em edificações altas”, Caderno de Engenharia 27, CPGEC / UFRGS, 1988.

BLESSMANN, J, “Tópicos de normas de vento”, Editora da Universidade / UFRGS, 1990.

BLESSMANN, J, “O vento na engenharia estrutural”, Editora da Universidade / UFRGS, 1995.

BLESSMANN, J, “Acidentes causados pelo vento”, Editora da Universidade / UFRGS, 2001.

Canadian Standards Association – CSA S37-94, “Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures. Ontario, 1994.

CARRIL Jr., C. F., “Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações”, Tese de doutorado, São Paulo - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

DAVENPORT, A. G., “The response of slender structures to wind”, In: Wind Climate in Cities, Waldbronn, Proceedings of NATO Advanced Study Institute, s. L., s. ed., 1993.

DE OLHO NO TEMPO, < Disponível em http://www.deolhonotempo.blogspot.com/2007_10_01_archive.html, 2007.

FOLHA UOL, < Disponível em <http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u110274.shtml>, 2005.

FRANCO, M., “Direct along wind dynamic analysis of tall structures”, Boletim Técnico, São Paulo, EPUSP, BT/PEF/9303, 1993.

GAZETA MERCANTIL, < Disponível em <http://indexet.gazetamercantil.com.br/arquivo/2005/06/22/156/CLIMA:-Tornado-e-chuva-de-granizo-provocam-prejuizos-no-Sudeste.html>, 2005.

GERE, J. & WEAVER, W., “Análise de Estruturas Reticuladas”, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.

GONTIJO, C. R., “Cálculo de torres para linhas de transmissão”, Instituto de Engenharia Aplicada, Belo Horizonte, 1994.

GUIMARÃES, M. J. R., “Análise estática e dinâmica de torres metálicas autoportantes”, Dissertação de mestrado, Brasília - DF: ENC/FT/UnB, 2000.

GUIMARÃES, E. H., “Análise do comportamento de torres de aço estaiadas sob a ação do vento”, Dissertação de mestrado, Uberlândia - MG: UFU, 2008.

- HATASHITA, L. S., “Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM”, Dissertação de mestrado, Curitiba - PR: PUC – PR, 2007.
- JORNAL DA MANHÃ ON LINE, < Disponível em <http://www.jmonline.com.br/novo/?noticias,2,CIDADE,42185,Anterior>, 2006.
- KLEIN, T., “Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas”, Dissertação de mestrado, Porto Alegre - RS: UFRGS, 2004.
- LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D. ALMEIDA, M. T., “Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão”, Editora Edgard Blücher LTDA, 1992.
- LOREDO-SOUZA, A. M., “The Behaviour of Transmission Lines Under High Wind”, Tese de Doutorado, Univesity of Western Ontario, London, Ontario - Canadá, 1996.
- MACHADO, A. C., “Caracterização das propriedades aerodinâmicas de torres metálicas para determinação da resposta devida ao vento”, Dissertação de mestrado, Porto Alegre - RS: UFRGS, 2003.
- MENIN, R. C. G., “Análise estática e dinâmica de torres estaiadas”, Dissertação de mestrado DM-009A/02, Brasília - DF: ENC/FT/UnB, 2002.
- MERCE, R. N., “Análise dinâmica de torres metálicas autoportantes sob a ação do vento”, Dissertação de mestrado, Brasília - DF: ENC/FT/UnB, 2003.
- NASCIMENTO, F. O. D. A., “Análise de estruturas metálicas de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações”, Dissertação de mestrado, Campinas - SP: UNICAMP, 2002.
- OLIVEIRA, M. I. R., “Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento”, Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro - RJ: UERJ, 2006.

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M). Agência Canal Energia: Notícias, < Disponível em <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=41981> >, 2004.

PASQUETTI, E., “Estabilidade estática e dinâmica de torres estaiadas”, Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro – RJ: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

PULINO, A. R. F., “Contribuição ao Estudo das Coberturas Pênseis”, Tese de Doutorado FEM040/91. Campinas: FEM – Unicamp, 1991.

PULINO, A. R. F., Notas de aula não publicadas. Brasília, 1998.

RIBEIRO, E. C., “Análise de torres metálicas estaiadas submetidas à ação do vento”, Dissertação de mestrado, Brasília - DF: ENC/FT/UnB, 2007.

RIPPEL, L. I., “Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão”, Dissertação de mestrado, Porto Alegre - RS: UFRGS, 2005.

TEODORO, C. O., “Um sistema computacional para a análise de pórticos planos em cabos-treliça”, Dissertação de mestrado, Brasília - DF: ENC/FT/UnB, 2002.

APÊNDICES

A – ARQUIVO DO BANCO DE DADOS (PERFIS)

Neste apêndice será apresentado o arquivo do banco de dados referente aos perfis (cantoneira simples).

Tabela A.1. – Banco de dados de perfis (Perfil.aco).

| BITOLA | PERFIL | ABA (cm) | ESPESSURA (cm) | ÁREA (cm²) | PESO (kN/cm) | R_{min} (cm) |
|---------------|------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5/8x5/8x1/8 | 1,60 | 0,31700 | 0,90 | 0,69e-04 | 0,32 |
| 2 | 7/8x7/8x1/8 | 2,22 | 0,31700 | 1,32 | 1,02e-04 | 0,46 |
| 3 | 1.1/4x1.1/4x1/8 | 3,20 | 0,31700 | 1,93 | 1,47e-04 | 0,64 |
| 4 | 1.1/2x1.1/2x1/8 | 3,81 | 0,31700 | 2,32 | 1,79e-04 | 0,76 |
| 5 | 1.1/2x1.1/2x3/16 | 3,81 | 0,47600 | 3,42 | 2,63e-04 | 0,74 |
| 6 | 1.1/2x1.1/2x1/4 | 3,81 | 0,63500 | 4,45 | 3,41e-04 | 0,74 |
| 7 | 1.3/4x1.3/4x1/8 | 4,45 | 0,31700 | 2,71 | 2,10e-04 | 0,89 |
| 8 | 1.3/4x1.3/4x3/16 | 4,45 | 0,47600 | 4,00 | 3,09e-04 | 0,89 |
| 9 | 1.3/4x1.3/4x1/4 | 4,45 | 0,63500 | 5,22 | 4,04e-04 | 0,86 |
| 10 | 2x2x3/16 | 5,10 | 0,47600 | 4,58 | 3,56e-04 | 1,02 |
| 11 | 2x2x1/4 | 5,10 | 0,63500 | 6,06 | 4,65e-04 | 0,99 |
| 12 | 2x2x5/16 | 5,10 | 0,79400 | 7,42 | 5,71e-04 | 0,99 |
| 13 | 2x2x3/8 | 5,10 | 0,95200 | 8,76 | 6,85e-04 | 0,99 |
| 14 | 2.1/2x2.1/2x3/16 | 6,40 | 0,47600 | 5,80 | 4,48e-04 | 1,24 |
| 15 | 2.1/2x2.1/2x1/4 | 6,40 | 0,63500 | 7,67 | 5,98e-04 | 1,24 |
| 16 | 2.1/2x2.1/2x5/16 | 6,40 | 0,79400 | 9,48 | 7,29e-04 | 1,24 |
| 17 | 2.1/2x2.1/2x3/8 | 6,40 | 0,95200 | 11,16 | 8,61e-04 | 1,22 |
| 18 | 3x3x1/4 | 7,60 | 0,63500 | 9,29 | 7,15e-04 | 1,50 |
| 19 | 3x3x5/16 | 7,60 | 0,79400 | 11,48 | 8,89e-04 | 1,50 |
| 20 | 3x3x3/8 | 7,60 | 0,95200 | 13,61 | 10,50e-04 | 1,47 |
| 21 | 3x3x7/16 | 7,60 | 1,11100 | 15,68 | 12,16e-04 | 1,47 |
| 22 | 3x3x1/2 | 7,60 | 1,27000 | 17,74 | 13,72e-04 | 1,47 |
| 23 | 4x4x5/16 | 10,20 | 0,79400 | 15,48 | 11,95e-04 | 2,00 |
| 24 | 4x4x3/8 | 10,20 | 0,95200 | 18,45 | 14,28e-04 | 2,00 |
| 25 | 4x4x7/16 | 10,20 | 1,11100 | 21,35 | 16,47e-04 | 1,98 |
| 26 | 4x4x1/2 | 10,20 | 1,27000 | 24,19 | 18,66e-04 | 1,98 |
| 27 | 5x5x5/16 | 12,70 | 0,79400 | 19,50 | 15,01e-04 | 2,53 |
| 28 | 5x5x3/8 | 12,70 | 0,95200 | 23,29 | 17,94e-04 | 2,51 |
| 29 | 5x5x1/2 | 12,70 | 1,27000 | 30,64 | 23,63e-04 | 2,49 |
| 30 | 5x5x5/8 | 12,70 | 1,58800 | 37,80 | 29,21e-04 | 2,46 |
| 31 | 6x6x3/8 | 15,24 | 1,95200 | 28,10 | 21,76e-04 | 3,02 |
| 32 | 6x6x7/16 | 15,24 | 1,11100 | 32,65 | 25,10e-04 | 3,02 |
| 33 | 6x6x1/2 | 15,24 | 1,27000 | 37,09 | 28,63e-04 | 3,00 |
| 34 | 6x6x9/16 | 15,24 | 1,42900 | 41,48 | 31,96e-04 | 3,00 |

B – ARQUIVO DO BANCO DE DADOS (CABOS)

Neste apêndice será apresentado o arquivo do banco de dados referente aos cabos condutores e pára-raios.

Tabela B.1.A – Banco de dados dos cabos (Cabo.aco).

| BITOLA | CABO | PESO (kN/cm) | ÁREA (cm ²) | CARGA DE RUPTURA (kN) |
|--------|------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 | Cordoalha 3/16'' | 0,1059e-04 | 13,518e-02 | 17,738 |
| 2 | Cordoalha 1/4'' | 0,1764e-04 | 24,032e-02 | 29,567 |
| 3 | Cordoalha 5/16'' | 0,2989e-04 | 37,550e-02 | 49,794 |
| 4 | Cordoalha 3/8'' | 0,3979e-04 | 54,072e-02 | 68,463 |
| 5 | Cordoalha 7/16'' | 0,5811e-04 | 73,598e-02 | 92,463 |
| 6 | Cordoalha 1/2'' | 0,7536e-04 | 96,129e-02 | 119,463 |
| 7 | Cordoalha 9/16'' | 0,9780e-04 | 121,663e-02 | 155,585 |
| 8 | Wren | 0,0331e-04 | 9,810e-02 | 3,333 |
| 9 | Warbler | 0,0417e-04 | 12,320e-02 | 4,167 |
| 10 | Turkey | 0,0525e-04 | 15,460e-02 | 5,196 |
| 11 | Thrush | 0,0663e-04 | 19,550e-02 | 6,471 |
| 12 | Swan | 0,0836 e-04 | 24,710e-02 | 8,137 |
| 13 | Swallow | 0,1055 e-04 | 31,100e-02 | 10,049 |
| 14 | Sparrow | 0,1329 e-04 | 39,220e-02 | 12,402 |
| 15 | Robin | 0,1677 e-04 | 49,480e-02 | 15,539 |
| 16 | Raven | 0,2117 e-04 | 62,380e-02 | 19,020 |
| 17 | Quail | 0,2667 e-04 | 78,640e-02 | 23,774 |
| 18 | Pigeon | 0,3362 e-04 | 99,230e-02 | 29,705 |
| 19 | Penguin | 0,4240 e-04 | 125,100e-02 | 37,451 |
| 20 | Partridge | 0,5347 e-04 | 157,200e-02 | 50,000 |
| 21 | Owl | 0,4968 e-04 | 152,700e-02 | 42,451 |
| 22 | Waxwing | 0,4214 e-04 | 142,600e-02 | 31,470 |
| 23 | Piper | 0,6833 e-04 | 187,500e-02 | 68,627 |
| 24 | Ostrich | 0,6007 e-04 | 176,700e-02 | 56,176 |
| 25 | Oriole | 0,7677 e-04 | 210,300e-02 | 75,833 |
| 26 | Linnet | 0,6739 e-04 | 198,300e-02 | 62,500 |
| 27 | Merlin | 0,5314 e-04 | 179,900e-02 | 39,804 |
| 28 | Chickadee | 0,6289 e-04 | 212,600e-02 | 46,245 |
| 29 | Lark | 0,9052 e-04 | 248,400e-02 | 88,823 |
| 30 | Ibis | 0,7958 e-04 | 234,300e-02 | 71,961 |
| 31 | Pelican | 0,7558 e-04 | 255,100e-02 | 54,696 |
| 32 | Flicker | 0,8962 e-04 | 273,000e-02 | 76,490 |

Tabela B.1.B – Banco de dados dos cabos (Cabo.aco).

| BITOLA | CABO | PESO (kN/cm) | ÁREA (cm²) | CARGA DE RUPTURA (kN) |
|---------------|-------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 33 | Hen | 1,0863 e-04 | 298,100e-02 | 103,823 |
| 34 | Hawk | 0,9558 e-04 | 298,100e-02 | 103,823 |
| 35 | Heron | 1,1392 e-04 | 312,400e-02 | 86,470 |
| 36 | Osprey | 0,8812 e-04 | 297,700e-02 | 63,814 |
| 37 | Parakeet | 1,0461 e-04 | 318,500e-02 | 88,274 |
| 38 | Eagle | 1,2676 e-04 | 347,800e-02 | 121,176 |
| 39 | Dove | 1,1147 e-04 | 327,900e-02 | 99,902 |
| 40 | Peacock | 1,1363 e-04 | 346,400e-02 | 96,059 |
| 41 | Squab | 1,2431 e-04 | 356,500e-02 | 107,392 |
| 42 | Teal | 1,3696 e-04 | 376,500e-02 | 133,627 |
| 43 | Duck | 1,1353e-04 | 346,400e-02 | 100,100 |
| 44 | Rook | 1,1951e-04 | 364,000e-02 | 100,725 |
| 45 | Egret | 1,4372e-04 | 395,600e-02 | 140,490 |
| 46 | Grosbeak | 1,2735e-04 | 347,700e-02 | 111,176 |
| 47 | Goose | 1,1941e-04 | 364,000e-02 | 105,196 |
| 48 | Flamingo | 1,2520e-04 | 381,600e-02 | 105,618 |
| 49 | Gull | 1,2510e-04 | 381,600e-02 | 109,216 |
| 50 | Redwing | 1,6157e-04 | 445,100e-02 | 153,823 |
| 51 | Starling | 1,4333e-04 | 421,600e-02 | 125,000 |
| 52 | Crow | 1,3431e-04 | 409,500e-02 | 117,157 |
| 53 | Tern | 1,3069e-04 | 430,700e-02 | 102,059 |
| 54 | Mallard | 1,7970e-04 | 494,700e-02 | 170,980 |
| 55 | Drake | 1,5921e-04 | 468,500e-02 | 138,970 |
| 56 | Condor | 1,4921e-04 | 455,100e-02 | 126,961 |
| 57 | Crane | 1,6412e-04 | 500,600e-02 | 139,657 |
| 58 | Canary | 1,6892e-04 | 515,200e-02 | 143,627 |
| 59 | Rail | 1,5686e-04 | 516,800e-02 | 119,627 |
| 60 | Cardinal | 1,7902e-04 | 546,100e-02 | 152,304 |
| 61 | Ortlan | 1,7000e-04 | 599,900e-02 | 127,853 |
| 62 | Curlew | 1,9402e-04 | 591,600e-02 | 165,196 |
| 63 | Bluejay | 1,8382e-04 | 603,000e-02 | 137,637 |
| 64 | Finch | 2,0784e-04 | 635,500e-02 | 178,774 |
| 65 | Bunting | 1,9676e-04 | 646,000e-02 | 147,637 |
| 66 | Grackle | 2,2265e-04 | 680,800e-02 | 191,667 |
| 67 | Bitten | 2,1010e-04 | 689,100e-02 | 157,421 |
| 68 | Pheasant | 2,3745e-04 | 726,200e-02 | 199,216 |
| 69 | Dipper | 2,2304e-04 | 732,300e-02 | 166,765 |
| 70 | Martin | 2,5235e-04 | 771,500e-02 | 211,667 |
| 71 | Bobolink | 2,3637e-04 | 775,500e-02 | 176,990 |
| 72 | Plover | 2,6716e-04 | 817,000e-02 | 224,118 |
| 73 | Nuthatch | 2,4931e-04 | 818,100e-02 | 178,186 |

C – BITOLAS DOS PERFIS

Nas próximas tabelas serão apresentadas as bitolas dos perfis utilizados para cada modelo numérico segundo a estrutura, subestrutura e tipo da peça (montantes, horizontais, diagonais e travamentos). Relembrando que as bitolas nessas tabelas correspondem ao número localizado na coluna das bitolas do arquivo do banco de dados do apêndice A (Perfil.aco).

Tabela C.1 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 50m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 13 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 7 | 10 | - |
| | Mísulas | - | 7 | 10 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 15 | - | 7 | 4 |
| | Extensões | 16 | 6 | 9 | 6 |
| | Pernas | 17 | 4 | 9 | 8 |

Tabela C.2 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 150m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 12 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 5 | 5 | - |
| | Mísulas | - | 5 | 5 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.3 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 250m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 12 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 6 | 6 | - |
| | Mísulas | - | 6 | 6 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.4 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 400m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 14 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 7 | 7 | - |
| | Mísulas | - | 7 | 7 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.5 – Bitolas dos perfis da torre para vãos iguais de 500m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 14 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 8 | 8 | - |
| | Mísulas | - | 8 | 8 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.6 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 50m e 150m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 12 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 5 | 5 | - |
| | Mísulas | - | 5 | 5 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.7 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 70m e 125m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 12 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 5 | 5 | - |
| | Mísulas | - | 5 | 5 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.8 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 180m e 220m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 12 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 5 | 5 | - |
| | Mísulas | - | 5 | 5 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.9 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 260m e 310m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 14 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 7 | 7 | - |
| | Mísulas | - | 7 | 7 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

Tabela C.10 – Bitolas dos perfis da torre para vãos diferentes de 350m e 400m.

| Estrutura | Subestrutura | Montantes | Horizontais | Diagonais | Travamentos |
|------------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Cabeça | Tronco da cabeça | 14 | 4 | 8 | 4 |
| | Suportes | - | 7 | 7 | - |
| | Mísulas | - | 7 | 7 | - |
| Tronco inferior | Tronco básico | 16 | - | 18 | 10 |
| | Extensões | 20 | 18 | 10 | 16 |
| | Pernas | 20 | 4 | 8 | 8 |

D – BITOLAS, ESFORÇO AXIAL E ENCURTAMENTOS DOS CABOS

As bitolas dos cabos quanto à função que desempenham na linha de transmissão (para-raios ou condutores), encurtamentos e os esforços axiais nos cabos serão apresentados nas tabelas abaixo. Os esforços são mostrados segundo a análise realizada, ou seja, sem vento ou com vento, além da porcentagem destes esforços em relação à carga de ruptura no caso de análise com vento.

Tabela D.1 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 50m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 0,63 | 20,794 | 20,794 | 30,36 |
| | | 19 | 0,63 | 20,794 | 20,794 | 30,36 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,12 | 41,461 | 41,500 | 27,25 |
| | | 21 | 0,12 | 41,470 | 41,500 | 27,25 |
| | | 22 | 0,12 | 41,461 | 41,520 | 27,26 |
| | | 23 | 0,12 | 41,461 | 41,500 | 27,25 |
| | | 24 | 0,12 | 41,470 | 41,539 | 27,27 |
| | | 25 | 0,12 | 41,461 | 41,490 | 27,24 |

Tabela D.2 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 150m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 1,94 | 21,578 | 21,588 | 31,52 |
| | | 19 | 1,94 | 21,578 | 21,598 | 31,53 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,37 | 50,676 | 50,814 | 33,36 |
| | | 21 | 0,37 | 50,667 | 50,804 | 33,36 |
| | | 22 | 0,37 | 50,676 | 50,814 | 33,36 |
| | | 23 | 0,37 | 50,696 | 50,794 | 33,35 |
| | | 24 | 0,37 | 50,676 | 50,804 | 33,36 |
| | | 25 | 0,37 | 50,686 | 50,804 | 33,36 |

Tabela D.3 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 250m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 3,03 | 20,755 | 20,774 | 30,33 |
| | | 19 | 3,03 | 20,755 | 20,804 | 30,37 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,36 | 50,784 | 50,990 | 33,48 |
| | | 21 | 0,36 | 50,784 | 51,029 | 33,51 |
| | | 22 | 0,36 | 50,774 | 50,970 | 33,46 |
| | | 23 | 0,36 | 50,774 | 51,049 | 33,52 |
| | | 24 | 0,36 | 50,765 | 51,067 | 33,53 |
| | | 25 | 0,36 | 50,784 | 51,010 | 33,49 |

Tabela D.4 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 400m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 4,34 | 29,627 | 29,667 | 43,32 |
| | | 19 | 4,34 | 29,637 | 29,667 | 43,31 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,56 | 71,745 | 72,127 | 47,36 |
| | | 21 | 0,56 | 71,745 | 72,088 | 47,33 |
| | | 22 | 0,56 | 71,735 | 72,069 | 47,32 |
| | | 23 | 0,56 | 71,735 | 71,990 | 47,27 |
| | | 24 | 0,56 | 71,745 | 72,020 | 47,29 |
| | | 25 | 0,56 | 71,755 | 72,098 | 47,34 |

Tabela D.5 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos iguais de 500m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 4,47 | 30,931 | 30,961 | 45,21 |
| | | 19 | 4,47 | 30,921 | 30,980 | 45,24 |
| Condutores | 60 | 20 | 0,62 | 82,265 | 82,618 | 54,25 |
| | | 21 | 0,62 | 82,274 | 82,676 | 54,28 |
| | | 22 | 0,62 | 82,274 | 82,637 | 54,24 |
| | | 23 | 0,62 | 82,265 | 82,618 | 54,27 |
| | | 24 | 0,62 | 82,274 | 82,637 | 54,26 |
| | | 25 | 0,62 | 82,265 | 82,627 | 54,25 |

Tabela D.6 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos diferentes de 50m e 150m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 0,80 | 22,853 | 22,814 | 33,31 |
| | | 19 | 1,72 | 20,363 | 20,392 | 29,77 |
| Condutores | 63 | 20 | 0,21 | 47,441 | 47,372 | 34,42 |
| | | 21 | 0,23 | 50,029 | 50,176 | 36,46 |
| | | 22 | 0,21 | 49,823 | 50,098 | 36,40 |
| | | 23 | 0,23 | 49,480 | 49,588 | 36,03 |
| | | 24 | 0,21 | 51,902 | 52,892 | 38,43 |
| | | 25 | 0,23 | 48,980 | 49,067 | 35,65 |

Tabela D.7 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos diferentes de 70m e 125m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 0,90 | 25,980 | 25,912 | 37,83 |
| | | 19 | 1,68 | 28,127 | 28,167 | 41,12 |
| Condutores | 63 | 20 | 0,22 | 63,020 | 62,823 | 45,64 |
| | | 21 | 0,27 | 60,902 | 61,127 | 44,41 |
| | | 22 | 0,22 | 62,392 | 62,618 | 45,49 |
| | | 23 | 0,27 | 61,216 | 61,265 | 44,51 |
| | | 24 | 0,22 | 62,069 | 63,157 | 45,89 |
| | | 25 | 0,27 | 61,363 | 61,108 | 44,40 |

Tabela D.8 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos diferentes de 180m e 220m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 1,90 | 18,451 | 18,461 | 26,96 |
| | | 19 | 2,70 | 20,412 | 20,431 | 29,83 |
| Condutores | 63 | 20 | 0,30 | 50,745 | 50,951 | 37,02 |
| | | 21 | 0,32 | 49,225 | 49,441 | 35,92 |
| | | 22 | 0,30 | 49,990 | 50,196 | 36,47 |
| | | 23 | 0,32 | 49,716 | 49,931 | 36,28 |
| | | 24 | 0,30 | 49,431 | 49,618 | 36,05 |
| | | 25 | 0,32 | 50,108 | 50,323 | 36,56 |

Tabela D.9 – Esforço axial e encurtamentos dos cabos para vãos diferentes de 350m e 400m.

| Função | Bitolas | Site | Encurtamentos (cm) | Análise sem vento | Análise com vento | |
|------------|---------|------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | | | Carga (kN) | Carga (kN) | PCR (%) |
| Pára-raios | 4 | 18 | 4,00 | 24,814 | 24,853 | 36,29 |
| | | 19 | 5,00 | 26,824 | 26,863 | 39,22 |
| Condutores | 63 | 20 | 0,65 | 72,951 | 73,284 | 53,24 |
| | | 21 | 0,55 | 71,480 | 71,843 | 52,20 |
| | | 22 | 0,65 | 72,539 | 72,823 | 52,91 |
| | | 23 | 0,55 | 71,804 | 72,118 | 52,40 |
| | | 24 | 0,65 | 72,275 | 72,520 | 52,69 |
| | | 25 | 0,55 | 72,020 | 72,314 | 52,54 |

E – ESFORÇOS NOS PERFIS

Neste apêndice serão apresentadas as forças máximas de tração e compressão nos perfis de cada modelo numérico. Além disso, são indicadas segundo a estrutura, subestrutura, *site*, tipo (M – montantes, H – horizontais, D – diagonais e T – travamentos) e análise (sem vento ou com vento).

Tabela E.1 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 50m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -3,421 | 6,353 | -10,461 |
| | | 2 | H | 1,971 | -1,314 | 2,147 | -1,608 |
| | | 3 | D | 0,441 | -1,529 | 1,667 | -3,255 |
| | | 4 | T | 0,000 | -0,245 | 0,039 | -0,343 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -1,343 | 0,000 | -1,892 |
| | | 6 | D | 3,167 | -0,441 | 3,167 | -0,539 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -6,372 | 5,676 | -17,304 |
| | | 8 | D | 0,314 | -5,019 | 5,520 | -15,451 |
| | | 9 | T | 0,216 | -0,088 | 0,372 | -0,118 |
| | Extensão | 10 | M | 0,059 | -7,343 | 5,402 | -16,921 |
| | | 11 | H | 1,755 | -3,608 | 11,088 | -10,833 |
| | | 12 | D | 0,333 | -1,304 | 22,843 | -13,921 |
| | | 13 | T | 5,941 | -2,539 | 6,353 | -15,020 |
| | Pernas | 14 | M | 0,294 | -12,225 | 33,921 | -45,598 |
| | | 15 | H | 0,078 | -0,274 | 4,941 | -3,206 |
| | | 16 | D | 0,539 | -0,196 | 3,412 | -0,186 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,127 | -4,255 |

Tabela E.2 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 150m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -5,520 | 6,412 | -13,265 |
| | | 2 | H | 4,520 | -3,039 | 4,539 | -3,265 |
| | | 3 | D | 1,059 | -3,206 | 2,363 | -4,931 |
| | | 4 | T | 0,059 | -0,578 | 0,059 | -0,657 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -3,882 | 0,000 | -4,431 |
| | | 6 | D | 8,353 | -0,892 | 8,353 | -1,049 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -12,588 | 4,010 | -25,098 |
| | | 8 | D | 1,245 | -8,049 | 4,029 | -19,912 |
| | | 9 | T | 0,608 | -0,225 | 0,667 | -0,196 |
| | Extensão | 10 | M | 0,147 | -12,951 | 1,892 | -24,480 |
| | | 11 | H | 3,049 | -8,069 | 14,931 | -11,049 |
| | | 12 | D | 0,382 | -2,225 | 23,176 | -15,284 |
| | | 13 | T | 12,627 | -4,392 | 13,343 | -20,470 |
| | Pernas | 14 | M | 0,216 | -19,421 | 35,431 | -53,970 |
| | | 15 | H | 0,176 | -0,304 | 5,510 | -3,431 |
| | | 16 | D | 0,549 | -0,186 | 3,647 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,029 | 2,274 | -4,549 |

Tabela E.3 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 250m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -8,147 | 8,794 | -18,578 |
| | | 2 | H | 7,225 | -4,921 | 7,343 | -5,323 |
| | | 3 | D | 1,716 | -4,970 | 3,461 | -7,127 |
| | | 4 | T | 0,108 | -0,961 | 0,186 | -1,039 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -6,421 | 0,000 | -7,216 |
| | | 6 | D | 13,735 | -1,441 | 13,735 | -1,588 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -15,921 | 4,725 | -33,765 |
| | | 8 | D | 1,657 | -11,637 | 4,961 | -27,765 |
| | | 9 | T | 0,823 | -0,217 | 1,245 | -0,372 |
| | Extensão | 10 | M | 0,147 | -15,774 | 3,088 | -32,951 |
| | | 11 | H | 3,392 | -7,833 | 16,647 | -12,510 |
| | | 12 | D | 0,333 | -2,647 | 28,441 | -17,608 |
| | | 13 | T | 12,647 | -4,892 | 13,225 | -22,853 |
| | Pernas | 14 | M | 0,255 | -22,863 | 39,098 | -52,970 |
| | | 15 | H | 0,294 | -0,304 | 6,608 | -3,431 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,186 | 3,647 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,029 | 2,274 | -4,539 |

Tabela E.4 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 400m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -10,990 | 12,078 | -25,284 |
| | | 2 | H | 10,882 | -7,461 | 11,078 | -7,872 |
| | | 3 | D | 2,500 | -7,245 | 5,147 | -10,970 |
| | | 4 | T | 0,186 | -1,470 | 0,000 | -1,588 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,001 | -10,167 | 0,001 | -11,284 |
| | | 6 | D | 21,353 | -2,137 | 21,343 | -2,304 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -19,598 | 7,323 | -44,402 |
| | | 8 | D | 2,137 | -15,667 | 8,235 | -37,686 |
| | | 9 | T | 1,059 | -0,216 | 1,578 | -0,363 |
| | Extensão | 10 | M | 0,157 | -18,735 | 7,520 | -40,676 |
| | | 11 | H | 3,794 | -7,559 | 16,294 | -13,598 |
| | | 12 | D | 0,372 | -3,098 | 28,245 | -16,167 |
| | | 13 | T | 12,706 | -5,470 | 13,333 | -22,372 |
| | Pernas | 14 | M | 0,225 | -27,643 | 39,343 | -64,539 |
| | | 15 | H | 0,402 | -0,316 | 5,951 | -3,431 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,194 | 3,647 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,031 | 2,265 | -4,539 |

Tabela E.5 – Esforços nos perfis para vãos iguais de 500m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,000 | -13,686 | 13,372 | -29,882 |
| | | 2 | H | 13,637 | -9,392 | 13,716 | -9,774 |
| | | 3 | D | 3,147 | -9,039 | 6,186 | -13,304 |
| | | 4 | T | 0,274 | -1,843 | 0,333 | -1,970 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,001 | -12,745 | 0,001 | -13,970 |
| | | 6 | D | 26,774 | -2,696 | 26,774 | -2,882 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -22,912 | 7,059 | -51,823 |
| | | 8 | D | 2,578 | -19,304 | 8,196 | -44,872 |
| | | 9 | T | 1,245 | -0,265 | 1,490 | -0,549 |
| | Extensão | 10 | M | 0,304 | -21,382 | 8,461 | -49,225 |
| | | 11 | H | 4,176 | -7,323 | 14,539 | -13,343 |
| | | 12 | D | 0,372 | -3,470 | 27,304 | -15,745 |
| | | 13 | T | 12,755 | -6,010 | 13,314 | -19,725 |
| | Pernas | 14 | M | 0,216 | -29,872 | 38,647 | -73,696 |
| | | 15 | H | 0,490 | -0,304 | 5,892 | -3,431 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,186 | 3,637 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,029 | 2,274 | -4,54 |

Tabela E.6 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 50m e 150m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 2,608 | -8,490 | 6,010 | -13,912 |
| | | 2 | H | 4,578 | -3,941 | 5,245 | -5,774 |
| | | 3 | D | 1,010 | -4,647 | 2,343 | -5,520 |
| | | 4 | T | 0,029 | -0,412 | 0,265 | -0,520 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 3,274 | -8,598 | 3,912 | -9,667 |
| | | 6 | D | 6,520 | -7,725 | 6,784 | -7,676 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 3,598 | -25,157 | 15,294 | -37,284 |
| | | 8 | D | 4,402 | -17,078 | 15,657 | -25,569 |
| | | 9 | T | 1,020 | -0,0372 | 3,137 | -0,470 |
| | Extensão | 10 | M | 3,951 | -26,686 | 14,421 | -37,392 |
| | | 11 | H | 3,559 | -9,010 | 15,539 | -11,255 |
| | | 12 | D | 1,343 | -3,118 | 22,912 | -15,774 |
| | | 13 | T | 12,608 | -5,088 | 13,343 | -21,206 |
| | Pernas | 14 | M | 0,549 | -34,323 | 37,206 | -70,735 |
| | | 15 | H | 0,863 | -1,108 | 6,059 | -3,470 |
| | | 16 | D | 0,569 | -0,186 | 3,696 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,274 | -4,539 |

Tabela E.7 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 70m e 125m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 1,980 | -6,470 | 9,716 | -15,294 |
| | | 2 | H | 3,716 | -2,794 | 4,863 | -4,392 |
| | | 3 | D | 0,961 | -3,255 | 2,127 | -5,431 |
| | | 4 | T | 0,000 | -0,402 | 0,176 | -0,520 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 2,294 | -7,490 | 1,520 | -6,892 |
| | | 6 | D | 5,735 | -6,725 | 5,970 | -7,078 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -18,235 | 9,176 | -30,706 |
| | | 8 | D | 2,049 | -11,069 | 9,725 | -19,676 |
| | | 9 | T | 1,157 | -0,412 | 4,245 | -0,529 |
| | Extensão | 10 | M | 1,059 | -19,520 | 8,490 | -31,863 |
| | | 11 | H | 3,176 | -8,618 | 15,157 | -11,000 |
| | | 12 | D | 1,108 | -2,676 | 22,588 | -15,480 |
| | | 13 | T | 12,588 | -4,569 | 13,363 | -20,725 |
| | Pernas | 14 | M | 0,490 | -26,608 | 36,618 | -64,294 |
| | | 15 | H | 0,500 | -0,539 | 5,872 | -3,451 |
| | | 16 | D | 0,559 | -0,186 | 3,676 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,274 | -4,539 |

Tabela E.8 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 180m e 220m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 1,618 | -11,510 | 11,510 | -20,686 |
| | | 2 | H | 6,108 | -4,823 | 6,118 | -5,108 |
| | | 3 | D | 1,529 | -5,402 | 3,059 | -7,049 |
| | | 4 | T | 0,000 | -0,774 | 0,000 | -0,853 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,000 | -8,804 | 0,000 | -9,402 |
| | | 6 | D | 11,255 | -6,696 | 11,274 | -6,823 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -19,098 | 9,578 | -34,549 |
| | | 8 | D | 2,392 | -14,833 | 9,235 | -29,020 |
| | | 9 | T | 0,716 | -0,225 | 0,863 | -0,245 |
| | Extensão | 10 | M | 0,157 | -19,069 | 7,304 | -31,990 |
| | | 11 | H | 3,255 | -8,147 | 14,716 | -11,255 |
| | | 12 | D | 0,461 | -2,647 | 22,510 | -15,049 |
| | | 13 | T | 12,647 | -4,676 | 13,265 | -20,206 |
| | Pernas | 14 | M | 0,608 | -26,255 | 35,510 | -57,921 |
| | | 15 | H | 0,490 | -0,304 | 5,343 | -3,441 |
| | | 16 | D | 0,549 | -0,186 | 3,647 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,039 | 2,274 | -4,549 |

Tabela E.9 – Esforços nos perfis para vãos diferentes de 350m e 400m.

| Estrutura | Subestrutura | Site | Tipo | Análise sem vento | | Análise com vento | |
|-----------------|------------------------|------|------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Tração (kN) | Compressão (kN) | Tração (kN) | Compressão (kN) |
| Cabeça | Tronco da cabeça | 1 | M | 0,833 | -15,294 | 15,353 | -28,980 |
| | | 2 | H | 11,333 | -8,196 | 11,353 | -8,480 |
| | | 3 | D | 2,706 | -8,078 | 4,961 | -10,765 |
| | | 4 | T | 0,000 | -1,431 | 0,000 | -1,490 |
| | Suporte e mísulas | 5 | H | 0,010 | -13,235 | 0,001 | -14,059 |
| | | 6 | D | 20,569 | -7,716 | 20,569 | -7,872 |
| Tronco inferior | Tronco básico inferior | 7 | M | 0,000 | -19,578 | 10,716 | -43,186 |
| | | 8 | D | 3,127 | -18,559 | 9,755 | -38,990 |
| | | 9 | T | 2,559 | -0,529 | 1,627 | -0,353 |
| | Extensão | 10 | M | 2,422 | -19,235 | 6,980 | -41,029 |
| | | 11 | H | 3,774 | -7,667 | 15,167 | -12,363 |
| | | 12 | D | 0,872 | -3,274 | 24,118 | -15,323 |
| | | 13 | T | 12,706 | -5,441 | 13,274 | -20,735 |
| | Pernas | 14 | M | 0,882 | -27,656 | 36,882 | -68,520 |
| | | 15 | H | 0,422 | -0,304 | 5,274 | -3,421 |
| | | 16 | D | 0,569 | -0,186 | 3,637 | -0,176 |
| | | 17 | T | 0,000 | -0,049 | 2,274 | -4,54 |

F – REAÇÕES DE APOIO

As reações de apoio nos montantes da torre e nas extremidades dos cabos serão apresentadas neste apêndice. São indicados os nós restringidos segundo sua localização na estrutura e os valores destas reações nas direções X, Y e Z, lembrando que os eixos são definidos conforme figura 7.1.

Tabela F.1 – Reações de apoio para vãos iguais de 50m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 1,235 | 12,137 | 1,216 | -8,774 | -8,118 | -10,794 |
| | 195 | -1,216 | 11,990 | 1,235 | -3,294 | 32,402 | 3,392 |
| | 196 | -1,245 | 12,078 | -1,235 | -3,294 | 32,000 | -3,225 |
| | 197 | 1,225 | 12,068 | -1,206 | -8,490 | -8,000 | 10,696 |
| Extremidades dos cabos | 293 | -0,000 | 0,098 | 20,794 | -0,029 | 0,098 | 20,784 |
| | 313 | -0,000 | 0,098 | -20,794 | -0,029 | 0,098 | -20,794 |
| | 333 | -0,000 | 0,098 | 20,794 | -0,029 | 0,098 | 20,784 |
| | 353 | -0,000 | 0,098 | -20,794 | -0,029 | 0,098 | -20,794 |
| | 373 | 0,000 | 0,431 | 41,460 | -0,069 | 0,421 | 41,490 |
| | 393 | 0,000 | 0,431 | -41,470 | -0,069 | 0,421 | -41,490 |
| | 413 | 0,000 | 0,431 | 41,460 | -0,069 | 0,431 | 41,490 |
| | 433 | 0,000 | 0,431 | -41,460 | -0,069 | 0,431 | -41,490 |
| | 453 | 0,000 | 0,421 | 41,460 | -0,069 | 0,421 | 41,490 |
| | 473 | 0,000 | 0,421 | -41,460 | -0,069 | 0,421 | -41,480 |
| | 493 | 0,000 | 0,421 | 41,450 | -0,069 | 0,431 | 41,490 |
| | 513 | 0,000 | 0,421 | -41,460 | -0,069 | 0,431 | -41,480 |
| | 533 | 0,000 | 0,421 | 41,460 | -0,059 | 0,421 | 41,500 |
| | 553 | 0,000 | 0,421 | -41,450 | -0,059 | 0,421 | -41,480 |
| | 573 | 0,000 | 0,421 | 41,460 | -0,059 | 0,431 | 41,500 |
| 593 | 0,000 | 0,421 | -41,450 | -0,059 | 0,431 | -41,47 | |

Tabela F.2 – Reações de apoio para vãos iguais de 150m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 1,961 | 19,314 | 1,961 | -9,794 | -5,176 | -10,902 |
| | 195 | -1,971 | 19,225 | 1,941 | -4,421 | 43,853 | 4,510 |
| | 196 | -1,951 | 19,167 | -1,931 | -4,441 | 43,804 | -4,402 |
| | 197 | 1,980 | 19,363 | -1,971 | -9,627 | -5,392 | 10,843 |
| Extremidades dos cabos | 293 | 0,000 | 0,284 | 21,569 | -0,059 | 0,284 | 21,569 |
| | 313 | 0,000 | 0,284 | -21,578 | -0,059 | 0,284 | -21,598 |
| | 333 | 0,000 | 0,284 | 21,569 | -0,059 | 0,284 | 21,569 |
| | 353 | 0,000 | 0,284 | -21,569 | -0,059 | 0,284 | -21,578 |
| | 373 | -0,000 | 1,274 | 50,667 | -0,176 | 1,274 | 50,784 |
| | 393 | -0,000 | 1,274 | -50,647 | -0,176 | 1,274 | -50,784 |
| | 413 | -0,000 | 1,274 | 50,637 | -0,176 | 1,284 | 50,765 |
| | 433 | -0,000 | 1,274 | -50,637 | -0,176 | 1,274 | -50,765 |
| | 453 | -0,000 | 1,274 | 50,667 | -0,166 | 1,274 | 50,784 |
| | 473 | -0,000 | 1,274 | -50,676 | -0,166 | 1,274 | -50,755 |
| | 493 | -0,000 | 1,274 | 50,608 | -0,166 | 1,274 | 50,774 |
| | 513 | -0,000 | 1,274 | -50,647 | -0,166 | 1,274 | -50,764 |
| | 533 | -0,000 | 1,274 | 50,657 | -0,166 | 1,274 | 50,794 |
| | 553 | -0,000 | 1,274 | -50,667 | -0,166 | 1,284 | -50,764 |
| 573 | -0,000 | 1,274 | 50,657 | -0,166 | 1,274 | 50,735 | |
| 593 | -0,000 | 1,274 | -50,637 | -0,166 | 1,274 | -50,75 | |

Tabela F.3 – Reações de apoio para vãos iguais de 250m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,304 | 22,696 | 2,284 | -7,814 | -7,759 | -12,353 |
| | 195 | -2,284 | 22,441 | 2,284 | -8,314 | 53,872 | 4,696 |
| | 196 | -2,284 | 22,421 | -2,284 | -5,431 | 49,392 | -3,618 |
| | 197 | 2,284 | 22,470 | -2,255 | -8,402 | -5,667 | 11,470 |
| Extremidades dos cabos | 293 | 0,000 | 0,470 | 20,755 | -0,088 | 0,470 | 20,755 |
| | 313 | 0,000 | 0,470 | -20,745 | -0,088 | 0,470 | -20,794 |
| | 333 | 0,000 | 0,470 | 20,745 | -0,088 | 0,470 | 20,765 |
| | 353 | 0,000 | 0,470 | -20,755 | -0,088 | 0,470 | -20,784 |
| | 373 | -0,000 | 2,127 | 50,735 | -0,294 | 2,127 | 50,941 |
| | 393 | -0,000 | 2,127 | -50,725 | -0,284 | 2,137 | -50,980 |
| | 413 | 0,000 | 2,127 | 50,735 | -0,284 | 2,127 | 50,921 |
| | 433 | 0,000 | 2,127 | -50,735 | -0,284 | 2,127 | -50,980 |
| | 453 | -0,000 | 2,127 | 50,725 | -0,284 | 2,127 | 50,921 |
| | 473 | -0,000 | 2,127 | -50,724 | -0,284 | 2,127 | -51,010 |
| | 493 | -0,000 | 2,127 | 50,725 | -0,284 | 2,127 | 50,912 |
| | 513 | -0,000 | 2,127 | -50,735 | -0,284 | 2,127 | -50,970 |
| | 533 | -0,000 | 2,127 | 50,725 | -0,274 | 2,127 | 50,902 |
| | 553 | -0,000 | 2,127 | -50,735 | -0,274 | 2,127 | -50,970 |
| | 573 | -0,000 | 2,127 | 50,725 | -0,274 | 2,147 | 51,020 |
| 593 | -0,000 | 2,127 | -50,715 | -0,274 | 2,127 | -50,85 | |

Tabela F.4 – Reações de apoio para vãos iguais de 400m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,667 | 26,333 | 2,657 | -9,098 | -10,294 | -12,392 |
| | 195 | -2,657 | 26,088 | 2,637 | -6,606 | 61,382 | 5,088 |
| | 196 | -2,657 | 26,068 | -2,647 | -9,147 | 64,745 | -5,696 |
| | 197 | 2,647 | 26,088 | -2,627 | -7,921 | -11,265 | 12,804 |
| Extremidades dos cabos | 305 | -0,000 | 0,774 | 29,618 | -0,147 | 0,774 | 29,657 |
| | 337 | -0,000 | 0,774 | -29,608 | -0,147 | 0,774 | -29,637 |
| | 369 | -0,000 | 0,774 | 29,618 | -0,147 | 0,774 | 29,647 |
| | 401 | -0,000 | 0,774 | -29,627 | -0,147 | 0,774 | -29,657 |
| | 433 | -0,000 | 3,470 | 71,657 | -0,470 | 3,470 | 72,010 |
| | 465 | -0,000 | 3,470 | -71,657 | -0,470 | 3,470 | -71,921 |
| | 497 | 0,000 | 3,470 | 71,647 | -0,470 | 3,480 | 72,030 |
| | 529 | 0,000 | 3,470 | -71,647 | -0,470 | 3,470 | -72,000 |
| | 561 | -0,000 | 3,470 | 71,657 | -0,460 | 3,470 | 71,980 |
| | 593 | -0,000 | 3,470 | -71,657 | -0,450 | 3,460 | -71,863 |
| | 625 | 0,000 | 3,470 | 71,647 | -0,460 | 3,470 | 71,931 |
| | 657 | 0,000 | 3,470 | -71,657 | -0,450 | 3,460 | -71,912 |
| | 689 | -0,000 | 3,470 | 71,657 | -0,441 | 3,470 | 71,941 |
| | 721 | -0,000 | 3,470 | -71,667 | -0,441 | 3,470 | -71,912 |
| 753 | 0,000 | 3,470 | 71,667 | -0,441 | 3,480 | 71,902 | |
| 785 | 0,000 | 3,470 | -71,667 | -0,441 | 3,470 | -72,01 | |

Tabela F.5 – Reações de apoio para vãos iguais de 500m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 3,000 | 29,598 | 2,980 | -8,157 | -11,343 | -12,608 |
| | 195 | -2,980 | 29,314 | 2,970 | -9,363 | 71,637 | 5,774 |
| | 196 | -3,000 | 29,500 | -2,990 | -7,529 | 68,794 | -5,186 |
| | 197 | 2,980 | 29,470 | -2,970 | -8,676 | -11,206 | 12,255 |
| Extremidades dos cabos | 313 | -0,000 | 0,970 | 30,902 | -0,186 | 0,970 | 30,941 |
| | 353 | -0,000 | 0,970 | -30,902 | -0,186 | 0,970 | -30,970 |
| | 393 | -0,000 | 0,970 | 30,912 | -0,186 | 0,970 | 30,941 |
| | 433 | -0,000 | 0,970 | -30,902 | -0,186 | 0,970 | -30,960 |
| | 473 | -0,000 | 4,363 | 82,147 | -0,588 | 4,363 | 82,480 |
| | 513 | -0,000 | 4,363 | -82,157 | -0,588 | 4,363 | -82,549 |
| | 553 | 0,000 | 4,363 | 82,147 | -0,588 | 4,363 | 82,500 |
| | 593 | 0,000 | 4,363 | -82,157 | -0,588 | 4,363 | -82,520 |
| | 633 | -0,000 | 4,363 | 82,157 | -0,578 | 4,363 | 82,451 |
| | 673 | -0,000 | 4,363 | -82,147 | -0,578 | 4,363 | -82,549 |
| | 713 | 0,000 | 4,363 | 82,157 | -0,568 | 4,363 | 82,500 |
| | 753 | 0,000 | 4,363 | -82,147 | -0,578 | 4,363 | -82,500 |
| | 793 | -0,000 | 4,363 | 82,157 | -0,559 | 4,363 | 82,441 |
| | 833 | -0,000 | 4,363 | -82,147 | -0,559 | 4,363 | -82,510 |
| | 873 | 0,000 | 4,363 | 82,157 | -0,559 | 4,363 | 82,510 |
| 913 | 0,000 | 4,363 | -82,147 | -0,559 | 4,363 | -82,45 | |

Tabela F.6 – Reações de apoio para vãos diferentes de 50m e 150m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 0,284 | 2,225 | 0,206 | -13,323 | -26,353 | -13,539 |
| | 195 | -0,167 | 1,716 | 0,206 | -2,470 | 25,627 | 3,000 |
| | 196 | -3,500 | 35,398 | -3,500 | -5,745 | 55,216 | -5,274 |
| | 197 | 3,363 | 35,010 | -3,314 | -6,059 | 17,088 | 8,225 |
| Extremidades dos cabos | 293 | -0,000 | 0,088 | 22,853 | -0,020 | 0,088 | 22,804 |
| | 313 | 0,000 | 0,284 | -20,363 | -0,059 | 0,284 | -20,392 |
| | 333 | -0,000 | 0,088 | 22,853 | -0,020 | 0,088 | 22,804 |
| | 353 | 0,000 | 0,284 | -20,363 | -0,059 | 0,284 | -20,382 |
| | 373 | -0,000 | 0,441 | 47,431 | -0,069 | 0,431 | 47,274 |
| | 393 | -0,000 | 1,314 | -50,010 | -0,186 | 1,304 | -50,108 |
| | 413 | 0,000 | 0,441 | 47,431 | -0,069 | 0,441 | 47,363 |
| | 433 | 0,000 | 1,314 | -50,010 | -0,186 | 1,314 | -50,157 |
| | 453 | -0,000 | 0,441 | 49,814 | -0,069 | 0,441 | 49,951 |
| | 473 | -0,000 | 1,314 | -49,451 | -0,176 | 1,314 | -49,569 |
| | 493 | 0,000 | 0,441 | 49,814 | -0,069 | 0,441 | 50,088 |
| | 513 | -0,000 | 1,314 | -49,461 | -0,176 | 1,314 | -49,529 |
| | 533 | 0,000 | 0,431 | 51,902 | -0,069 | 0,441 | 52,490 |
| | 553 | -0,000 | 1,314 | -48,961 | -0,176 | 1,314 | -49,060 |
| | 573 | 0,000 | 0,441 | 51,882 | -0,069 | 0,441 | 52,882 |
| 593 | -0,000 | 1,314 | -48,961 | -0,176 | 1,314 | -48,92 | |

Tabela F.7 – Reações de apoio para vãos diferentes de 70m e 125m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 0,990 | 9,412 | 0,872 | -12,039 | -18,392 | -12,578 |
| | 195 | -0,912 | 9,010 | 0,853 | -3,069 | 30,294 | 3,137 |
| | 196 | -2,725 | 26,470 | -2,755 | -5,059 | 50,176 | -5,049 |
| | 197 | 2,657 | 26,402 | -2,676 | -7,363 | 9,176 | 9,039 |
| Extremidades dos cabos | 298 | 0,000 | 0,137 | 25,970 | -0,029 | 0,137 | 25,902 |
| | 323 | 0,000 | 0,235 | -28,127 | -0,049 | 0,235 | -28,167 |
| | 348 | 0,000 | 0,137 | 25,970 | -0,029 | 0,137 | 25,912 |
| | 373 | 0,000 | 0,235 | -28,117 | -0,049 | 0,235 | -28,157 |
| | 398 | -0,000 | 0,618 | 63,020 | -0,088 | 0,618 | 62,765 |
| | 423 | -0,000 | 1,108 | -60,892 | -0,157 | 1,108 | -61,118 |
| | 448 | -0,000 | 0,618 | 63,010 | -0,098 | 0,618 | 62,823 |
| | 473 | -0,000 | 1,108 | -60,892 | -0,157 | 1,108 | -61,098 |
| | 498 | -0,000 | 0,618 | 62,392 | -0,088 | 0,618 | 62,470 |
| | 523 | 0,000 | 1,108 | -61,206 | -0,147 | 1,108 | -61,245 |
| | 548 | -0,000 | 0,618 | 62,372 | -0,088 | 0,618 | 62,608 |
| | 573 | 0,000 | 1,108 | -61,206 | -0,147 | 1,108 | -61,186 |
| | 598 | -0,000 | 0,618 | 62,069 | -0,088 | 0,618 | 62,784 |
| | 623 | 0,000 | 1,108 | -61,353 | -0,147 | 1,108 | -61,098 |
| | 648 | -0,000 | 0,618 | 62,049 | -0,088 | 0,618 | 63,157 |
| 673 | 0,000 | 1,098 | -61,353 | -0,147 | 1,108 | -60,91 | |

Tabela F.8 – Reações de apoio para vãos diferentes de 180m e 220m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,559 | 25,588 | 2,461 | -8,814 | 0,117 | -10,353 |
| | 195 | -2,657 | 25,804 | 2,539 | -5,333 | 52,000 | 5,088 |
| | 196 | -1,578 | 15,755 | -1,657 | -4,363 | 44,127 | -4,706 |
| | 197 | 1,676 | 16,294 | -1,755 | -10,745 | 12,814 | 11,696 |
| Extremidades dos cabos | 293 | 0,000 | 0,343 | 18,441 | -0,069 | 0,343 | 18,461 |
| | 313 | 0,000 | 0,412 | -20,402 | -0,079 | 0,412 | -20,431 |
| | 333 | -0,000 | 0,343 | 18,441 | -0,069 | 0,343 | 18,461 |
| | 353 | 0,000 | 0,412 | -20,402 | -0,079 | 0,412 | -20,421 |
| | 373 | 0,000 | 1,569 | 50,706 | -0,216 | 1,578 | 50,921 |
| | 393 | -0,000 | 1,921 | -49,167 | -0,265 | 1,921 | -49,402 |
| | 413 | 0,000 | 1,569 | 50,725 | -0,216 | 1,578 | 50,911 |
| | 433 | -0,000 | 1,921 | -49,186 | -0,265 | 1,921 | -49,372 |
| | 453 | 0,000 | 1,569 | 49,961 | -0,216 | 1,569 | 50,176 |
| | 473 | -0,000 | 1,921 | -49,676 | -0,255 | 1,921 | -49,892 |
| | 493 | 0,000 | 1,569 | 49,951 | -0,216 | 1,569 | 50,117 |
| | 513 | -0,000 | 1,921 | -49,657 | -0,255 | 1,921 | -49,843 |
| | 533 | -0,000 | 1,569 | 49,402 | -0,206 | 1,569 | 49,598 |
| | 553 | -0,000 | 1,921 | -50,069 | -0,255 | 1,921 | -50,284 |
| | 573 | 0,000 | 1,569 | 49,328 | -0,206 | 1,569 | 49,569 |
| 593 | -0,000 | 1,921 | -50,049 | -0,255 | 1,921 | -50,28 | |

Tabela F.9 – Reações de apoio para vãos diferentes de 350m e 400m.

| Localização | Nó | Análise sem vento | | | Análise com vento | | |
|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) | R _x (kN) | R _y (kN) | R _z (kN) |
| Montantes da torre | 194 | 2,500 | 24,959 | 2,216 | -10,304 | -12,216 | -12,069 |
| | 195 | -2,471 | 25,582 | 2,333 | -6,216 | 61,823 | 6,255 |
| | 196 | -2,735 | 27,816 | -2,706 | -6,284 | 62,853 | -6,441 |
| | 197 | 2,706 | 28,622 | -2,872 | -9,892 | -9,725 | 11,431 |
| Extremidades dos cabos | 298 | 0,000 | 0,704 | 24,803 | -0,127 | 0,667 | 24,843 |
| | 323 | 0,000 | 0,796 | -26,804 | -0,147 | 0,755 | -26,833 |
| | 348 | -0,000 | 0,704 | 24,794 | -0,127 | 0,676 | 24,843 |
| | 373 | -0,000 | 0,796 | -26,814 | -0,147 | 0,765 | -26,853 |
| | 398 | -0,000 | 3,214 | 72,882 | -0,431 | 3,088 | 73,216 |
| | 423 | -0,000 | 3,673 | -71,363 | -0,490 | 3,529 | -71,755 |
| | 448 | 0,000 | 3,214 | 72,843 | -0,431 | 3,088 | 73,157 |
| | 473 | 0,000 | 3,673 | -71,392 | -0,490 | 3,529 | -71,696 |
| | 498 | -0,000 | 3,088 | 72,471 | -0,421 | 3,088 | 72,755 |
| | 523 | -0,000 | 3,529 | -71,657 | -0,470 | 3,529 | -72,029 |
| | 548 | 0,000 | 3,088 | 72,451 | -0,421 | 3,088 | 72,755 |
| | 573 | 0,000 | 3,529 | -71,716 | -0,470 | 3,529 | -72,019 |
| | 598 | -0,000 | 3,088 | 72,206 | -0,402 | 3,088 | 72,451 |
| | 623 | -0,000 | 3,529 | -71,872 | -0,461 | 3,529 | -72,196 |
| | 648 | 0,000 | 3,088 | 72,147 | -0,402 | 3,088 | 72,421 |
| 673 | 0,000 | 3,529 | -71,931 | -0,461 | 3,529 | -72,23 | |