



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DAISIRÉE SILVA DE JESUS
DOUGLAS NASCIMENTO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELA ASCE 10 (1997) E NBR 8800
(2008)**

Tucuruí – PA
2016

DAISIRÉE SILVA DE JESUS
DOUGLAS NASCIMENTO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELA ASCE 10 (1997) E NBR 8800
(2008)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil, na
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof^o. Dr. Aarão
Ferreira Lima Neto.

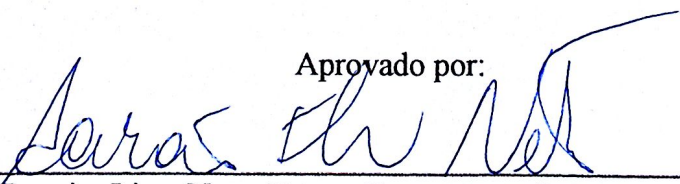
DAISIRÉE SILVA DE JESUS
DOUGLAS NASCIMENTO DOS SANTOS

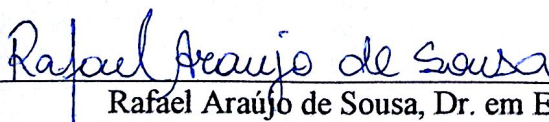
**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELA ASCE 10 (1997) E NBR 8800
(2008)**

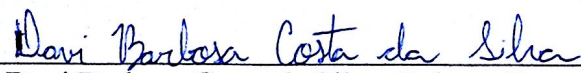
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil, na
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará.

Tucuruí, 26 de Janeiro de 2016.

Aprovado por:


Aarão Ferreira Lima Neto, Dr. em Estruturas e Construção Civil (UFPA)
(Orientador)


Rafael Araújo de Sousa, Dr. em Estruturas (PUC)
(Examinador Interno)


Davi Barbosa Costa da Silva, Bel. em Engenharia Civil (UFPA)
(Examinador Interno)

DEDICATÓRIA

Dedicamos aos nossos pais, irmãos, familiares e amigos, que tem sido a principal razão e incentivo de nosso aperfeiçoamento técnico. À vocês, nossa eterna gratidão.

AGRADECIMENTO

Primeiramente à Deus, que sempre esteve conosco, nos permitindo concluir mais essa etapa de nossas vidas.

Aos nossos pais Ivanilde Alves, Luiza Ribeiro e Bernardo Villar, por seu amor, incentivo e condições de estarmos aqui hoje.

Aos nossos irmãos Rodrigo Nascimento, Patrícia Nascimento e Diego Antônio pela ajuda e presença em nossas vidas.

A todos nossos familiares pela compreensão nos vários momentos de ausência e pelo incentivo para que conquistássemos nosso objetivo.

Ao professor Dr. Aarão Ferreira pela orientação deste trabalho, pela confiança depositada em nós, por sua dedicação e apoio para nosso crescimento pessoal e profissional.

Aos nossos professores da faculdade pelos ensinamentos, conselhos e amizade.

Aos nossos amigos de faculdade por toda ajuda, companheirismo e momentos de descontração.

Ao nosso amigo engenheiro Davi Barbosa pelas preciosas dicas.

Aos nossos amigos que nos acompanharam desde antes da faculdade, nos estudos, na busca pelos nossos sonhos.

EPÍGRAFE

"Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu."

Érico Veríssimo

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise comparativa do dimensionamento de suportes de linhas de transmissão de energia elétrica pela NBR 8800 (2008) e pela ASCE 10 (1997). Segundo a ABNT a NBR 8800 (2008) apresenta a função de nortear o dimensionamento de suporte para linha de transmissão em território brasileiro. No entanto, os softwares utilizados pelo setor elétrico no Brasil apresentam como base a norma americana ASCE 10-97, devido sua especificidade. Para comparação entre as normas foi obtido as forças estáticas do vento a partir dos critérios da NBR 5422 (1985). A torre selecionada para o dimensionamento é do tipo autoportante de suspensão com 50,7 metros de altura e para a modelagem utilizou-se o *software* SAP2000. Em seguida, coletou-se as solicitações proporcionadas pelo software SAP2000 e realizou-se o dimensionamento no programa Microsoft Office Excel 2013 seguindo os critérios de dimensionamento de cada norma. Os dados obtidos através da análise comparativa revelaram que a torre dimensionada pelos critérios da Norma Brasileira apresentou perfis solicitados à compressão mais robustos e, conseqüentemente, mais pesados que a torre dimensionada pela Norma Americana. Contudo, suportes metálicos esbeltos são mais propensos a falhar antes da carga última de resistência, por serem mais suscetíveis a falhas por flambagem e ações dinâmicas do vento, causando na estrutura deformação plástica excessiva ou instabilidade. A ASCE 10 (1997) é uma norma específica para este tipo de estrutura, já no Brasil, é recomendada a utilização da NBR 8800 (2008), que tem como objetivo direcionar o dimensionamento de estruturas de aço e concreto de edifícios. Por se tratar de uma norma geral, suas restrições podem gerar grandes margens de segurança para estruturas que não apresentam funções habitacionais ou laborais, por não contemplar com precisão particularidades desse tipo de estrutura. Portanto, torna-se imprescindível estudos mais aprofundados sobre suportes de linhas de transmissão no Brasil, para que seja proposto critérios de dimensionamentos pormenorizados, adequados para a especificidade desse tipo de estrutura.

Palavra-Chave: Suporte de linhas de transmissão. NBR 8800 (2008). ASCE 10 (1997). Análise comparativa.

ABSTRACT

This project presents a comparative analysis of the design of supports of electric power transmission lines by NBR 8800 (2008) and by ASCE 10 (1997). According to ABNT NBR, 8800 (2008) presents the function of guiding the support scaling for the transmission line in Brazil. However, the software used by the energy sector in Brazil are based on the American standard ASCE 10-97, because of its specificity. For comparison of the standards it was obtained wind of static forces from the criteria of NBR 5422 (1985). The tower design is selected for the freestanding type of suspension of 50.7 meters and for modeling, it was used the SAP2000 software. Then, the requests provided by the software SAP2000 were gathered up and held up scaling in Microsoft Office Excel 2013 program following the design criteria of each standard. Data obtained from the comparative analysis revealed that the tower dimensioned according to the criteria presented in Brazilian Standard profiles obtained from the more robust compression and therefore heavier than the tower scaled by the American Standard. Long, slender metal brackets are more likely to fail before the last resistance load, because they are more susceptible to failure by buckling and wind dynamic actions, causing the structure excessive plastic deformation or instability. ASCE 10 (1997) is a specific provision for this type of structure, as in Brazil, it is recommended the use of NBR 8800 (2008), which aims to direct the design of steel structures and concrete buildings. Because it is a general rule, their restrictions can generate large safety margins for structures that have no housing or employment duties by not look precisely particularities of this type of structure. Therefore, it is essential to further study on transmission lines carriers in Brazil, to be proposed criteria detailed sizing suitable for the specificity of this type of structure.

Key words: transmission line support. NBR 8800 (2008). ASCE 10 (1997). Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Suporte de linhas de transmissão de energia.	19
Figura 2 - Produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.	25
Figura 3 - Tipos de torres quanto à disposição dos condutores.....	26
Figura 4 - Tipos de torres quanto ao formato.	27
Figura 5 - Árvore de cargas.	30
Figura 6 - Isoladores a pino, linha até 69 kV.	31
Figura 7 - Isoladores tipo pedestal.....	32
Figura 8 - Isoladores de disco.....	32
Figura 9 - Cadeia de suspensão convencional.	33
Figura 10 - Cabos suspensos em duas torres autoportantes.	33
Figura 11 - Dimensões da cantoneira.	42
Figura 12 - Distância entre furos.	45
Figura 13 - Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura.	47
Figura 14 - Velocidade básica do vento no Brasil [m/s].	47
Figura 15 - Fator de efetividade (α).....	48
Figura 16 - Ação do vento sobre um tronco de suporte.....	49
Figura 17 - Coeficiente de arrasto para painéis de suporte treliçados.	50
Figura 18 - Determinação de índice w/t.	52
Figura 19 - Vista superior da torre (dimensões em cm).	55
Figura 20 - Comprimento e configuração dos braços da torre (dimensão em mm).	56
Figura 21 – Elevações e perspectivas da torre.....	56
Figura 22 - (1) Travamento em Y; (2) Travamento em K; (3) Travamento em diagonais; (4) Sem travamento; e (5) Travamento horizontal [mm].	57
Figura 23 - Configuração de perfis cantoneira.	58

Figura 24 - Modelo de barras rotuladas.....	59
Figura 25 - Modelo adotada para os apoios.....	60
Figura 26 - Projeção dos troncos de pirâmide no plano vertical (cotas em mm).	61
Figura 27 – Hipótese 1: Cabos intactos com vão gravante máximo (kgf).	65
Figura 28 - Hipóteses 2a e 2b: Rompimento do cabo para-raios com vão gravante máximo (kgf).	65
Figura 29 - Hipóteses 3a-f: Rompimento do cabo condutor com vão gravante máximo (kgf).	65
Figura 30 – Hipótese 4: Cabos intactos com vão gravante mínimo (kgf).	66
Figura 31 - Hipóteses 5a e 5b: Rompimento do cabo para-raios vão gravante mínimo (kgf)..	66
Figura 32 - Hipóteses 6a-f: Rompimento do cabo condutor com vão gravante máximo (kgf).	67
Figura 33 - Hipótese 7: Cargas devida à construção (kgf).	67
Figura 34 - Representação dos grupos.....	68
Figura 35 - Fluxograma para dimensionamento de peças de torres.	70
Figura 36 - Fluxograma de dimensionamento para NBR 8800 (2008).	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação do peso total dos grupos da torre metálica.....	77
Gráfico 2 - Peso total das estruturas modeladas.....	78
Gráfico 3 – Porcentagem do peso dos grupos pelo peso total da torre.....	78
Gráfico 4 - Frequência natural das torres.	80
Gráfico 5 - Resistência à compressão.....	81
Gráfico 6 - Relação entre a resistência da seção 3.1/2”1/4” e o comprimento.....	82
Gráfico 7 – Resistência à tração.	84

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Classificação das linhas de transmissão.....	25
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de rugosidade do terreno.	46
Tabela 2 - Valores de (n) para Correção da Velocidade do Vento em função da Altura.	48
Tabela 3 –Carregamentos aplicados sobre os suportes segundo NBR 5422 (N).	61
Tabela 4 – Carregamento aplicado referente à ação de vento na torre, segundo a ASCE 10 (N).	62
Tabela 5 - Carregamento aplicado referente à ação do vento na torre, segundo a NBR 8800 (N).	62
Tabela 6 - Carga de vento nos cabos.	63
Tabela 7 – Carga de vento nos isoladores.	63
Tabela 8 - Solicitações nos pontos de fixação dos cabos em kgf.	63
Tabela 9 - Elementos mais solicitados a compressão.	74
Tabela 10 - Elementos mais solicitados a tração.	74
Tabela 11 - Perfis adotados para resistir as solicitações de compressão.	75
Tabela 12 - Perfis adotados para resistir as solicitações à tração.	76
Tabela 13 - Frequência natural das torres (Hz).	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACC	All aluminum conductor
ACSR	Aluminum conductor steel reinforced
ALT	Altitude média da região de implantação da linha
<i>apud</i>	citado por, segundo
ASCE	American Society of Civil Engineers
AT	Alta tensão
CA	Cabos de alumínio
CAA	Cabo de alumínio com alma de aço
CM	Circular mil
EDS	Condição de temperature media e sem efeito do vento
<i>et.al.</i>	e outros
etc.	entre outros
GPa	Giga-Pascal
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
INMETRO	Instituto Nacional de metrologia, qualidade e tecnologia
Kgf	Quilograma-força
Km	Quilômetros
kV	Quilo-Volts
m	metro
mm	milímetro
MCM	Mil circular mil
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
°C	Graus Celsius

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas:

A_b	Área bruta
A_{be}	Área efetiva
A_c	Esforço decorrente da ação do vento sobre os cabos
A_e	Área líquida efetiva
A_g	Área bruta
A_i	Esforço decorrente da ação do vento sobre os isoladores
A_n	Área líquida
A_t	Esforço devido à ação direta do vento sobre o suporte
C_t	Coefficiente de redução da área líquida
C_x	Coefficiente de arrasto
d	Diâmetro do cabo condutor ou para-raios
d_b	Diâmetro externo da rosca da barra redonda rosqueada
d_f	Diâmetro do furo
d_p	Diâmetro nominal do parafuso
E	Módulo de elasticidade
f	Frequência
F_a	Tensão limite de compressão
F_c	Tensão limite de compressão
F_{cr}	Tensão limite de compressão para cantoneiras
F_t	Tensão limite de tração
f_u	Resistência à ruptura do aço
F_Y	Tensão de escoamento
G	São as distâncias entre furos na direção perpendicular ao esforço
H	Altura total
k	Coefficiente do comprimento efetivo
K	Coefficiente de flambagem
K_d	Coefficiente de correção do período de integração
K_f	Coefficiente de rugosidade do terreno
K_g	Coefficiente de ponderação
K_l	Coefficiente de ponderação para as cargas longitudinais

K_t	Coefficiente de ponderação para cargas transversais
K_v	Coefficiente de ponderação para cargas verticais
L	Carga longitudinal
L	Comprimento de flambagem
L_u	Limite de Ruptura
L_y	Limite de Escoamento
$L1$	Comprimento livre do perfil isolado
$L2$	Comprimento de flambagem do perfil composto
n	Coefficiente de correção da velocidade do vento em função da altura
N	Quantidade de furos
N_{cf}	Número de condutores por fase
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
P_c	Peso do cabo condutor ou para-raios
P_{cf}	Peso das cadeias de isoladores e das ferragens de fixação dos cabos
P_g	Cargas devida ao peso próprio
P_p	Peso de cada painel
Q	Fator de redução total associado à flambagem local
q_o	Pressão dinâmica de referência
r	Raio de giração
R_d	Representa a resistência de cálculo do suporte
R_{dc}	Resistência de cálculo à compressão
R_{dt}	Resistência de cálculo à tração
R_k	Representa a resistência limite do suporte
S	São as distâncias entre furos na direção paralela ao esforço
S_d	Representa as solicitações de cálculo atuantes nos diferentes elementos do suporte
S_{dc}	Solicitação de cálculo à compressão
S_{dt}	Solicitação de cálculo à tração
S_i	Área da cadeia de isoladores
S_T	Área líquida total
t	Temperatura coincidente

t	Espessura do perfil
T	Cargas Transversais
T	Período
T_0	Valor máximo de tração no cabo durante a vida útil da linha
V	Cargas verticais
V_b	Velocidade básica do vento
V_g	Vão gravante ou vão de peso da estrutura
V_p	Velocidade do vento de projeto
V_v	Vão de vento da torre
Z	Comprimento do vão considerado

Letras Gregas

α	Fator de efetividade, Largura da aba
γ	Valor do ângulo de mudança de direção da linha na torre
γ_{a1}	Coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade
γ_{a2}	Coeficiente de ponderação relacionado à ruptura
θ	Ângulo de incidência do vento em relação à direção do vão
ρ	Massa específica do ar
Φ_C	Fator de resistência relacionado à resistência característica
Φ_N	Fator de resistência devido ao número de componentes sujeitos ao carregamento de máxima intensidade
Φ_Q	Fator de resistência devido à qualidade de fabricação e montagem
Φ_R	Fator de minoração da resistência limite
Φ_S	Fator de resistência devido à coordenação de resistência
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão
φ	Ângulo de incidência do vento em relação à direção da linha

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo geral.....	20
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.4 ÁREA E LIMITAÇÃO DO TEMA.....	21
1.5 ESTRUTURA do TRABALHO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 BREVE HISTÓRICO	23
2.2 CÁLCULO DE TORRES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO (GONTIJO, 1994)..	25
2.3 PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO – LABEGALINI <i>et al.</i> (1992)	31
2.4 NORMAS TÉCNICAS	35
2.4.1 NBR 8800 (2008) – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios	35
2.4.1.1 <i>Especificações técnicas de dimensionamento à tração</i>	35
2.4.1.2 <i>Especificações técnicas dimensionamento à compressão</i>	37
2.4.2 NBR 8850 (2003) – Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento.....	38
2.4.2.1 <i>Especificações técnicas do dimensionamento à compressão</i>	41
2.4.2.2 <i>Especificações técnicas dimensionamento à tração</i>	44
2.4.3 NBR 5422 (1985) – Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica	45
2.4.4 ASCE 10 (1997) – Design of Latticed Steel Transmission Structures	50
2.4.4.1 <i>Especificações técnicas dimensionamento à compressão</i>	50
2.4.4.2 <i>Especificações técnicas dimensionamento à tração</i>	54
3 METODOLOGIA CIENTÍFICA.....	55
3.1 GEOMETRIA, MATERIAL, SEÇÕES E LIGAÇÕES ENTRE BARRAS.....	55
3.2 MODELAGEM DA ESTRUTURA	58
3.3 AÇÕES CONSIDERADAS.....	60
3.3.1 Peso próprio.....	60
3.3.2 Vento	60
3.3.2.1 <i>Ação de vento na torre</i>	61
3.3.2.2 <i>Ação de vento nos cabos</i>	62
3.3.2.3 <i>Ação de vento nos isoladores</i>	63
3.3.3 Cabos.....	63
3.4 HIPÓTESES DE CÁLCULO	64

3.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS.....	67
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	72
4.1 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DAS TORRES DE TRANSMISSÃO ..	73
4.1.1 Solicitações das barras às tensões de tração e compressão	73
4.1.2 Dimensionamento das barras comprimidas.....	75
4.1.3 Dimensionamento das barras tracionados	76
4.1.4 Peso do suporte de linha de transmissão	77
4.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES.....	79
4.3 COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA DE RESULTADOS DOS CALCULO DA NBR 8800 (2008) E ASCE 10 (1997)	80
4.3.1 Dimensionamento das peças solicitadas a compressão.....	81
4.3.2 Dimensionamento das peças solicitadas à tração	83
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
5.1 CONCLUSÕES	85
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXO A - CANTONEIRAS DE ABAS IGUAIS GERDAU®	90
ANEXO B – PLANTAS DO SUPORTE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A maior parte da energia gerada no Brasil procede das inúmeras usinas hidrelétricas, que são as principais fontes de energia do país devido à grande quantidade de recursos hídricos. A energia gerada nem sempre é utilizada perto da região onde se localiza a usina, então a energia é transportada para as outras regiões e até mesmo para outro país por meio de linhas de transmissão.

Como as linhas de transmissão precisam atravessar grandes distâncias, de maneira inevitável, passam por dentro de cidades, de florestas, estradas, entre outros lugares. Para evitar problemas como interferência em rádios e televisões, ruídos, impactos ambientais e até mesmo possíveis danos à saúde, devido aos campos eletromagnéticos, devem-se considerar vários critérios no projeto de linhas de transmissão.

O projeto de uma linha de transmissão visa mínima perdas energéticas, custo reduzido, segurança e menor impacto ambiental possível. As linhas são apoiadas por torres de transmissão de energia, que são elementos deste estudo. As torres de transmissão de energia elétrica são estruturas treliçadas, normalmente compostas por perfis-cantoneira de aço e suas ligações se encontram aparafusadas, como pode-se observar na figura abaixo.

Figura 1 - Suporte de linhas de transmissão de energia.



Fonte: Singh (2009).

1.2 JUSTIFICATIVA

Em toda construção, bem como na implantação de uma linha de transmissão de energia elétrica, o projeto adequado é a base prioritária para a execução com baixo custo, menor impacto ambiental e redução no tempo de execução, onde o conhecimento do engenheiro civil é essencial para atingir tais metas. O presente trabalho busca mostrar as diferenças de dimensionamento entre a Norma Brasileira - NBR 8800 (2008) e a *American Society of Civil Engineers - ASCE 10* (1997), ressaltando principalmente as considerações presente no processo de dimensionamento à tração e à compressão dos perfis da torre. O estudo da diferença das normas auxilia os projetistas estruturais a compreenderem melhor o processo básico de dimensionamento dos suportes de linha de transmissão.

Atualmente, a norma Brasileira utilizada e recomendada para o dimensionamento de torres de transmissão é a NBR 8800 (2008), que trata dos projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Uma vez que a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), no ano de 2013, cancelou por falta de uso no setor elétrico a NBR 8850 (1985), norma nacional direcionada ao fornecimento de orientações para o dimensionamento de suportes de linhas de transmissão, que é similar a norma americana ASCE 10 (1997). Com isso, a norma americana, que é utilizada nos *softwares* de dimensionamento do setor elétrico, vem sendo uma das principais normas empregadas no Brasil para o dimensionamento de suportes metálicos para linha de transmissão, devido sua especificidade.

O dimensionamento de suportes de linhas de transmissão de energia elétrica é de suma importância para o desenvolvimento do país, já que delas depende o processo de transmissão de energia. Obter contribuições para o dimensionamento desse suporte reduz o grau de incerteza, de modo que o comportamento da estrutura seja apropriado sem que exista superdimensionamento desta.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo consiste em dimensionar o suporte de linhas de transmissão de energia elétrica pelas duas principais normas utilizadas no Brasil, que é a NBR

8800 (2008), norma recomendada no território Brasileiro, e ASCE 10 (1997), norma Americana presente nos *softwares* específicos para torres de transmissão. Será comparado as diversas etapas de cálculo das solicitações, análise estrutural, dimensionamento e verificação, citando as principais semelhanças e divergências normativas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Apresentar uma análise comparativa entre o emprego do sistema de estrutura metálica no Brasil e nos Estados Unidos da América;
- Mostrar uma análise comparativa dos cálculos e critérios de projetos adotados pela ASCE 10 (1997) com os critérios da NBR 8800 (2008);
- Averiguar a viabilidade técnica e o custo-benefício da construção de torres de linhas de transmissão utilizando o dimensionamento pelas duas normas, por meio da comparação de peso em aço, dos esforços internos e deslocamentos resultantes.

1.4 ÁREA E LIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho de conclusão de curso limita-se a mostrar à comparação entre a norma americana ASCE 10 (1997) e a norma nacional NBR 8800 (2008) no dimensionamento de suportes metálico de linha de transmissão no território Brasileiro. Para tanto, foi utilizado um modelo de estrutura autoportante para realização dos cálculos, sendo que as solicitações impostas na estrutura estão de acordo com as normas internas do Brasil.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos. A seguir, apresenta-se o escopo do mesmo, descrevendo o que está sendo abordado em cada capítulo. No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos sobre o dimensionamento de suportes de linhas de transmissão de energia elétrica. Além disso, são apresentadas e descritas todas as normas que são necessárias à análise e dimensionamento de estruturas de torres treliçadas com seção em cantoneira.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada para a análise e dimensionamento das torres de distribuição de energia elétrica, o modelo estrutural, os carregamentos considerados, as hipóteses de cálculo e a modelagem utilizada. Neste capítulo explica-se de forma detalhada o processo que conduziu à modelação, análise e dimensionamento da estrutura, assim como todos cálculos necessários à obtenção dos resultados.

No capítulo 4 efetua-se o estudo entre as duas normas, que ao nível dos resultados obtidos no dimensionamento. São apresentados os resultados das diversas análises e considerações referentes a cada análise. No capítulo 5 são apresentadas concisamente as principais conclusões do estudo realizado e dimensionamento de torres treliçadas de distribuição de energia e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTÓRICO

As estruturas de torres metálicas e seus componentes são alvo de pesquisas e experimentos há algum tempo. Esses estudos são de suma importância para o reconhecimento paulatino do comportamento das estruturas reais, quando submetidas as mais diversas solicitações de cargas e intempéries. No intuito de nortear tanto o presente trabalho quanto futuras pesquisas, a seguir, serão expostos resumidamente os principais estudos que contribuíram cientificamente nas estruturas de torres metálicas.

Um dos primeiros trabalhos concretizado foi sobre os efeitos de rigidez das ligações e o efeito das grandes deformações foi Roy *et al.* (1984), onde concluiu que as torres altas em perfil cantoneira de alta-tensão submetidas a carregamentos elevados são mais flexíveis e os efeitos de segunda ordem são mais representativos. Em 1986, Prickett *et al.*, realizaram um trabalho no qual empregaram métodos de análises computacionais juntamente com ensaios experimentais em escala real para avaliar o comportamento das torres de transmissão no seu estado limite último.

Ainda em 1986, Bayar determinou o coeficiente de arrasto de um modelo composto de cantoneiras simples e duplas, por meio de ensaios realizados no túnel de vento com um protótipo reduzido de uma torre treliçada autoportante de seção quadrada. No trabalho do Bayar foi verificado a influência do ângulo de incidência do vento para torres localadas em morros, propondo equações para determinação dos coeficientes de arrasto utilizando o índice de área exposta da estrutura. Com um experimento em escala real de estrutura plana e tridimensional, contraventadas nas formas K e X, Rajmane, em 1992, concluiu que a norma varia em ora subestimar, ora superestimar as resistências das estruturas na análise elástica linear. Após um ano, Natarajan e Santhakumar realizaram um estudo de abordagem probabilística em projetos de torres de transmissão de energia com intuito de otimizar os projetos estruturais, para deste modo obter maior confiabilidade do sistema estrutural adotado.

Kahla (1994), analisou numericamente as implicações dinâmicas que são atuantes na análise de torres metálicas estaiadas e os efeitos gerados pelo galope dos cabos. Para isso, ele fez uso dos elementos não-lineares de cabos para representar os estais e para simular o mastro foram utilizados os elementos de pórticos espaciais. Logo depois, Desai *et al.* (1985),

apresentaram formulações de um elemento finito para estudo dos galopes dos condutores dos cabos da linha de transmissão de energia. O estudo desenvolvido considerou a não-linearidade física e geométrica; e a não-linearidade do amortecimento. Utilizaram-se elementos de vigas-colunas para representar as pernas principais e elementos de treliças para representar os contraventamentos através de um estudo realizado por Hui *et al.*, em 1996, que apresentaram modo de traçar a trajetória de deformação utilizando a análise não-linear geométrica de torres de transmissão de energia.

O estudo feito por Mikitarenko e Perelmuter (1998), teve por objetivo avaliar e estudar a vida útil das estruturas de aço foi proposto modelo para representar o histórico de tensões atuantes em cada membro. Para analisar os efeitos de fadiga nas estruturas espaciais de torre de aço, foram considerados diferentes níveis de amortecimento. Neste mesmo ano, Chuenmei e Shan, usaram elementos de placas para fazer a modelagem dos membros constituintes de uma torre metálica, no entanto, esse método gerou excessivo grau de liberdade o que tornou esse método de modelagem pouco prático.

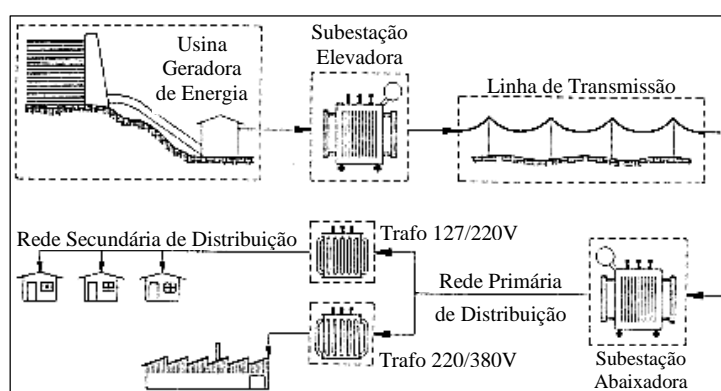
Em 1999, Rodrigues propôs modelagem do sistema estrutural de torre de transmissão de energia, considerando o conjunto formado pela torre, cadeias de isoladores e cabos. O objetivo da pesquisa foi investigar as possíveis causas de alguns acidentes associados as ações do vento. No ano seguinte, Kahla publicou estudo realizado sobre a resposta dinâmica de uma torre de aço estaiada após a ruptura de um cabo, essa análise foi feita por meio de um software criado pelo próprio Kahla. O autor concluiu que desconsiderando as ações do vento, a ruptura de um dos cabos, revela-se uma hipótese crítica de carregamento para esse tipo de estrutura.

Rao e Kalyanaraman (2001), utilizaram o *software* CAM-Nastran para realizar análise não-linear física e geométrica de torres treliçadas e de cantoneiras comprimidas. Os dados obtidos foram primeiramente nivelados ao teste em escala real e em seguida foi executada a comparação com as recomendações de normas técnicas. Em seguida, Rao e Kalyanaraman analisaram computacionalmente os efeitos de não-linearidade geométrica e os efeitos de plasticidade em painéis de torres de aço treliçadas. Esse estudo possibilitou determinar os esforços presentes no contraventamento secundário, pois as solicitações no contravento secundário não aparecem na análise linear. Magalhães e Chagas (2001), apresentaram um artigo questionando a confiabilidade das linhas de transmissão da usina hidroelétrica de Itaipu. No qual foram abordados inúmeros acidentes, além de apresentar soluções de reforço estrutural das torres ainda existentes.

2.2 CÁLCULO DE TORRES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO (GONTIJO, 1994)

Um sistema elétrico é composto fundamentalmente por três elementos, como pode-se observar na figura 2, que são: produção de energia, transmissão e distribuição da energia aos consumidores finais. A transmissão de energia para os centros consumidores é feita através de linhas elétricas de transmissão, usualmente a tensões elevadas. O quadro 1 mostra uma classificação para linhas em função do seu nível de tensão.

Figura 2 - Produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.



Fonte: Gontijo (1994).

Quadro 1 - Classificação das linhas de transmissão.

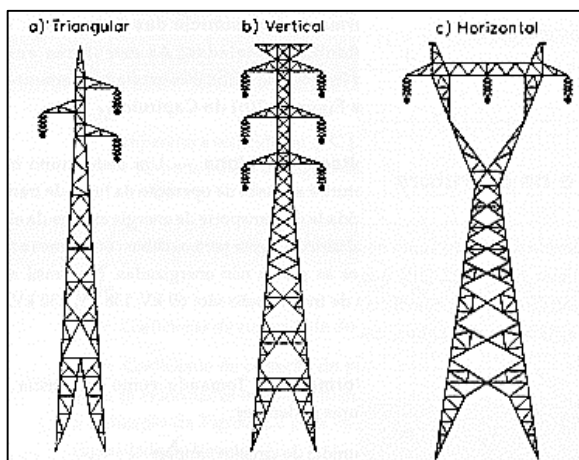
Nível de Tensão	Classificação
≤ 230 kV	AT (Alta tensão)
Entre 230 kV e 700 kV	EAT (Extra alta tensão)
> 700 kV	UAT (Ultra alta tensão)

Fonte: Gontijo (1994).

Existem normas brasileiras e estrangeiras que orientam a fabricação de suporte para linhas de transmissão além de especificações estabelecidas pela contratante. Esses suportes podem ser classificados:

- a) **Quanto à Disposição dos Condutores** – Podem ser divididas em triangular, vertical e horizontal. A figura 3 ilustra através das estruturas (a), (b) e (c), respectivamente, esta classificação.
- b) **Quanto ao Número de Circuitos** – Na figura 3, as estruturas (a) e (c) são torres de um circuito. A estrutura (b) é uma torre de dois circuitos, um à direita e outro à esquerda.

Figura 3 - Tipos de torres quanto à disposição dos condutores.



Fonte: Gontijo (1994).

c) Quanto à Função na Linha:

- Estrutura de suspensão são quando as torres funcionam como uma estrutura de sustentação dos cabos condutores, suspensos através das cadeias de isoladores, e dos cabos para-raios, suspensos por aparelhos. São utilizadas em maior quantidade na linha e usadas em alinhamento ou pequeno ângulo;
- Estrutura de ancoragem é utilizada para ancoragem dos cabos. Pode ser classificada como terminal, quando usada nas extremidades da linha de transmissão, ou como de ancoragem intermediária, quando colocada entre as estruturas de suspensão em intervalos variáveis de 5 km. Serve ainda como ponto de tensionamento, além de evitar o efeito cascata;
- Estrutura em ângulo é utilizada em locais onde existe a necessidade de mudança de direção da linha de transmissão;
- Estrutura de derivação é utilizada caso seja necessária uma derivação em um ponto da linha;
- Estrutura de transposição é utilizada para assegurar a simetria elétrica de uma linha obtida com a rotação das fases.

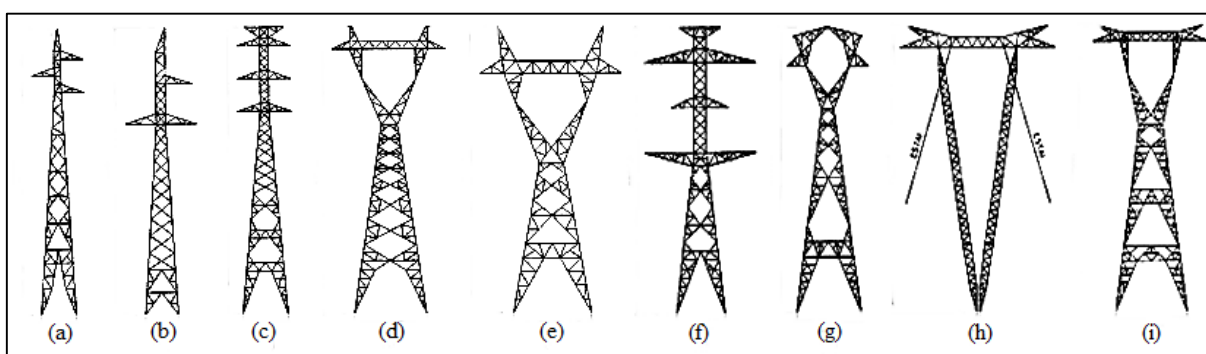
d) Quanto à Forma de Resistência das Estruturas – São classificadas como autoportantes e estaiadas. As estruturas autoportantes são usadas em todas as funções na linha e as estaiadas somente como estrutura de suspensão.

e) Quanto à Voltagem da Linha – Um dado muito importante para o projeto de uma estrutura é a tensão de operação da linha de transmissão. Quando aumentarmos a

capacidade de transporte de energia através da elevação da tensão, necessitam-se de um diâmetro maior para os cabos condutores e maiores distâncias elétricas desses cabos às partes não energizadas. No Brasil, as voltagens mais utilizadas em linhas de transmissão são: 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV e 765 kV.

- f) **Quanto ao Formato** – Tomando como referência a figura 4, as estruturas podem ter diversos formatos, tais como: Tronco-Piramidal de circuito simples (Figura 4a e 4b); Tronco-Piramidal de circuito duplo (Figura 4c e 4f); Delta (Figura 4d, 4e e 4i); Delta-Cara de Gato (Figura 4g); e Estaiada (4h).

Figura 4 - Tipos de torres quanto ao formato.



Fonte: Gontijo (1994).

As cargas consideradas no dimensionamento de uma estrutura são de duas naturezas: normais, quando ocorrem frequentemente, e excepcionais, quando têm pequena probabilidade de ocorrer durante o período de vida útil da linha de transmissão. O método de dimensionamento das estruturas utilizado no passado era o das tensões admissíveis. Neste método comparavam-se as tensões atuantes nos elementos estruturais, obtidas através de carregamentos nominais, com as tensões últimas divididas por um coeficiente de segurança, maior para cargas normais e menor para cargas excepcionais.

Utiliza-se, principalmente, o método dos coeficientes das ações, no qual multiplica-se cada tipo de ação nominal por um coeficiente de ponderação específico que irá depender da natureza da solicitação e da hipótese de cálculo a ser verificada. As tensões calculadas por esse processo são comparadas com as tensões últimas, obtidas das condições de escoamento de seções e de flambagem de barras, ou com tensões últimas divididas por um coeficiente de segurança no caso de dimensionamento das ligações. Os esforços mecânicos que atuam em uma torre de linha de transmissão são:

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

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

$$P_g = K_g \cdot P_p \quad (1)$$

Adota-se valores diferentes deste coeficiente de ponderação ao serem consideradas as hipóteses de cálculo com vão gravante máximo ou com vão gravante mínimo. Vão gravante máximo é a maior distância observada entre os pontos de tangencia horizontal das duas catenárias adjacentes à uma determinada torre, e vão gravante mínimo é a menor distancia observada para a situação análoga à anterior. Recomenda-se os seguintes valores mínimos para o coeficiente de ponderação: Para as hipóteses de cargas verticais máximas ou com vão gravante máximo o K_g é igual 1,10; Para as hipóteses de cargas verticais mínimas ou com vão gravante mínimo o K_g é igual a 1,00.

Forças Devidas à Ação do Vento na Estrutura – A ação do vento na estrutura é determinada aplicando-se o vento máximo em hipóteses de cálculo com cargas normais, isto é, de ocorrência frequente durante a vida útil da linha. Para as hipóteses de cálculo com cargas excepcionais, com baixa probabilidade de ocorrência durante o período de vida útil da linha de transmissão, é recomendada a aplicação de um vento igual ao médio máximo. Geralmente estas hipóteses são verificadas com o vento atuando perpendicularmente às faces da torre e à 45°.

Cargas nos Pontos de Fixação dos Cabos:

- Cargas Verticais: São cargas devidas ao peso dos cabos e acessórios.

$$V = (P_c \cdot N_{cf} \cdot V_g \cdot P_{cf}) \cdot K_v \quad (2)$$

Onde:

P_c é o peso do cabo condutor ou para-raios por unidades de comprimento;

N_{cf} é o número de cabos por fase;

V_g é o vão gravante ou vão de peso da estrutura;

P_{cf} é o peso das cadeias de isoladores e das ferragens de fixação dos cabos;

K_v é o coeficiente de ponderação para cargas verticais. Adotar coeficiente de 1,15 para as hipóteses que utilizam o vão gravante máximo, e 1,0 para vão gravante mínimo.

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

$$T = (q_0 \cdot N_{cf} \cdot \alpha \cdot d \cdot V_v \cdot \text{sen}^2 \varphi + 1,2q_0 \cdot S_i) \cdot K_{t1} + T_0 \cdot \text{sen } w\gamma \cdot K_{T2} \quad (3)$$

Onde:

q_0 é a pressão do vento;

N_{cf} é o número de condutores por fase. No caso do para-raios geralmente é igual a unidade;

α é o fator de efetividade;

d é o diâmetro do cabo condutor ou para-raios;

V_v é o vão de vento da torre;

φ é o ângulo de incidência do vento em relação à direção da linha;

S_i é a área da cadeia de isoladores projetada ortogonalmente sobre um plano vertical;

K_{t1} é o coeficiente de ponderação para cargas transversais devidas à ação do vento;

T_0 é o valor máximo de tração no cabo durante a vida útil da linha;

$w = 1$ (torres em ângulo nas extremidades da linha), $0,5$ (torres em ângulo no meio da linha);

γ é o valor do ângulo de mudança de direção da linha na torre;

K_{T2} é o coeficiente de ponderação para as cargas transversais devidas à componente transversal da força de tração dos cabos.

- Cargas Longitudinais: São forças devidas ao rompimento de cabos ou à tração dos cabos condutor e para-raios em torre de fim de linha.

$$L = zT_0 \cdot K_l \quad (4)$$

Onde:

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

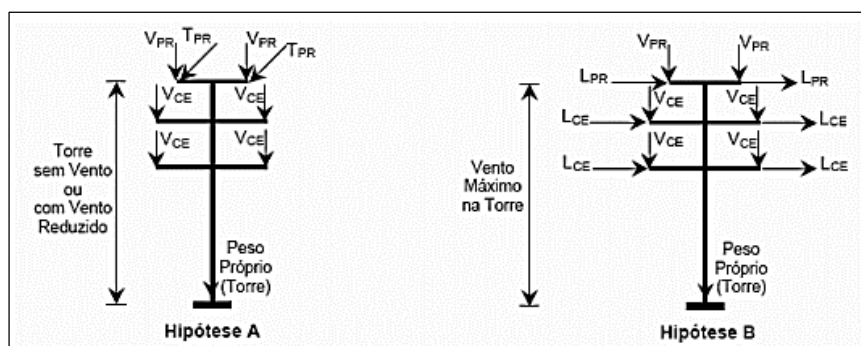
$z = 1,0$ No caso de rompimento do cabo para-raios em torres de suspensão e ancoragem, no de rompimento do cabo condutor em torres de ancoragem e no caso de tração dos cabos em torres de fim de linha;

T_0 é o valor máximo de tração no cabo durante a vida útil da linha;

K_l é o coeficiente de ponderação para as cargas longitudinais.

As cargas de projeto devem ser adequadamente combinadas entre si, de modo a obter um conjunto de hipóteses de cálculo para fins de verificação de estabilidade da torre de transmissão, garantido, desta forma, a segurança da linha de transmissão. As hipóteses de cálculo devem considerar: a região onde será implantado o suporte, pois dependendo do local de implantação da torre talvez haja a necessidade de considerar a formação de gelos na estrutura, nos cabos condutores e para-raios; do tipo de estrutura (se for estrutura de ancoragem e de fim de linha o tipo de carregamento é diferente). Geralmente, esses carregamentos são agrupados em desenhos esquemáticos, chamados de “árvores de cargas”, que correspondem às inúmeras hipóteses de carregamento que a torre de transmissão está submetida (Figura 5).

Figura 5 - Árvore de cargas.



Fonte: Veloso *et al.* (2010).

Onde:

V é a carga vertical;

L é a carga lateral;

T é a carga transversal;

PR são os para-raios;

CE são os condutores elétricos.

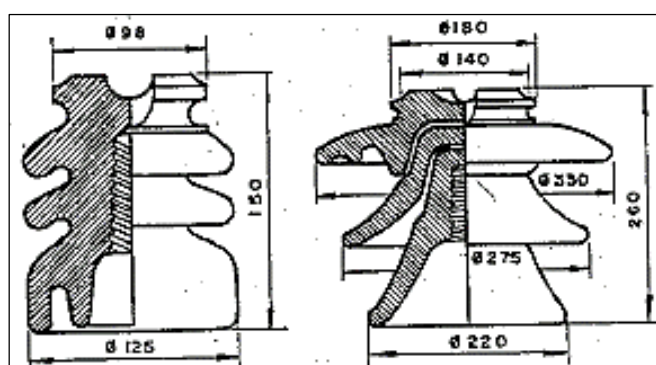
2.3 PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO – LABEGALINI *et al.* (1992)

2.3.1 Cadeia de Isoladores

Os cabos condutores da linha de transmissão, devem ser isolados eletricamente de seu suporte e do solo, função essa incumbida ao ar que os envolve, auxiliados por elementos denominados isoladores. Os isoladores têm a função de evitar a passagem de corrente do condutor ao apoio ou suporte e sustentar mecanicamente os cabos, barramentos e outros. Para a transmissão de energia elétrica são empregados basicamente três tipos de isoladores, sendo eles: Isoladores de pinos, Isoladores tipo pilar ou coluna, e isoladores de suspensão.

Isoladores de pino: são fixados às estruturas, por meio de um pino de aço e são geralmente fabricados em vidro ou em porcelana vidrada. O emprego desse elemento limita-se a linha de classe 66/75 kV (Figura 6).

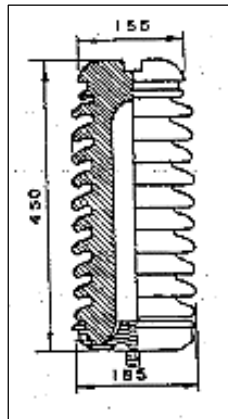
Figura 6 - Isoladores a pino, linha até 69 kV.



Fonte: Labegalini *et al.* (1992).

Isoladores tipo “Pilar” ou “Coluna”: são construídos em peça única em porcelana vidrada ou em vidro temperado. Esse tipo de isolador é pouco utilizado nas linhas de transmissão brasileira, como pode-se observar na figura 7.

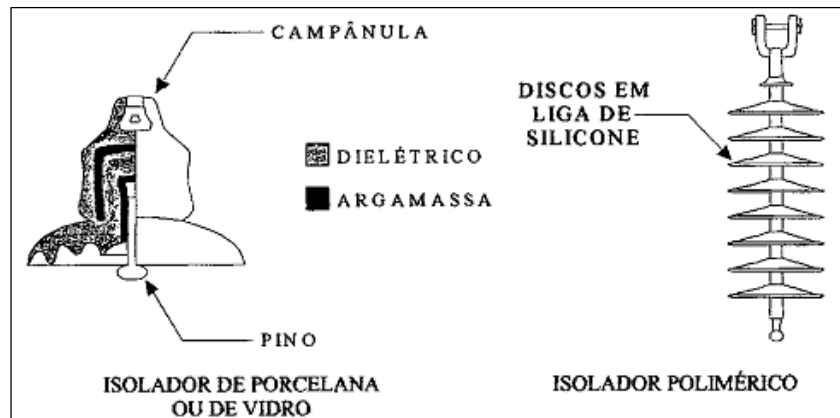
Figura 7 - Isoladores tipo pedestal.



Fonte: Labegalini *et al.* (1992).

Isoladores de suspensão: são os mais recomendados para linha de transmissão de alta tensão. Segundo Battista (2011), o tipo de isoladores de suspensão mais utilizado no Brasil é o de disco, composto de um corpo isolante de porcelana ou de vidro, com ferragens necessárias à montagem. Já os isoladores poliméricos são frequentemente especificados em novos projetos de linhas de transmissão, devido sua resistência ao vandalismo além de serem mais leves (Figura 8).

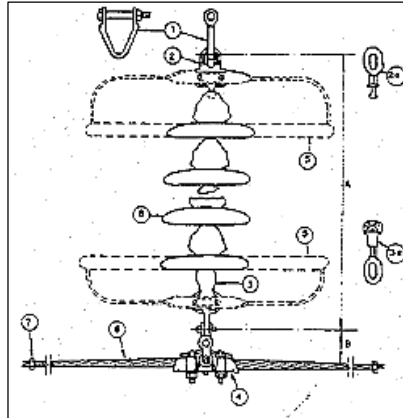
Figura 8 - Isoladores de disco.



Fonte: Battista (2011).

Os isoladores formam cadeias devidos suas conexões em série, que mecanicamente, funcionam como bielãs de suspensão dos cabos condutores, como pode-se observar na figura 9. O comprimento da biela depende do número de isoladores utilizados (KOELLER, 2012). De acordo com Labegalini *et al.* (1992) as cadeias de isoladores devem suportar os condutores e transmitir a torre de transmissão todos os esforços recebidos destes.

Figura 9 - Cadeia de suspensão convencional.

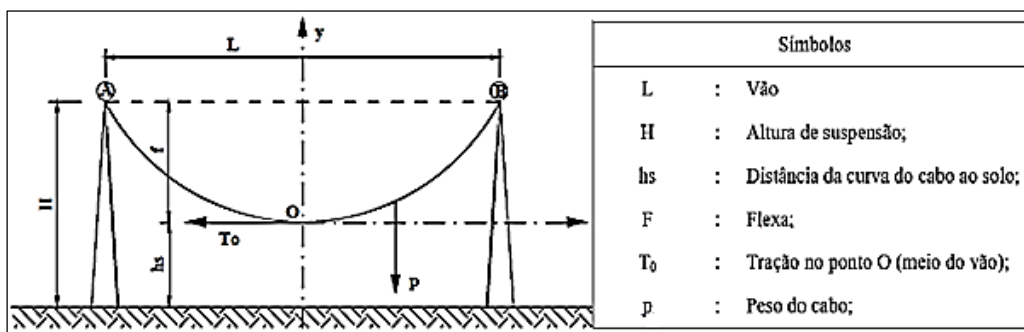


Fonte: Labegalini *et al.* (1992).

2.3.2 Cabos condutores

Os cabos condutores são guias para o transporte dos agentes da energia elétrica que são os campos elétricos e os campos magnéticos. Os cabos condutores são decisivos na construção de uma linha de transmissão, sendo que o mesmo deve ser dimensionado para que haja a menor perda possível de energia (por efeito Joule ou efeito Corona), além de controlar os níveis de rádio interferência e ruídos acústicos. Para evitar problemas mecânicos na linha de transmissão, os condutores devem estar livre de solicitações excessivas.

Figura 10 - Cabos suspensos em duas torres autoportantes.



Fonte: Singh (2009).

Os cabos de linha de transmissão de energia elétrica podem ser considerados flexíveis quando as torres de transmissão estiverem razoavelmente afastadas entre si, de forma a descrever uma catenária, quando suspenso. Logo, os esforços axiais, o comprimento do cabo, as reações de apoio nos pontos de fixação dos cabos na torre e a flexa, são calculadas com base

nas equações da catenária. Como pôde-se observar, a figura 10 apresenta um sistema que simula um cabo suspenso em dois suportes.

Os cabos condutores empregam normalmente os seguintes materiais: cobre ou alumínio. O cobre, apresenta alta condutividade elétrica, menor apenas do que a condutividade da prata, no entanto, por questões econômicas o cobre torna-se cada menos presente em projetos de linha aérea de transmissão. Por sua vez, o alumínio, apresenta apenas 61% da condutividade do cobre, porém, atualmente é o material que domina a fabricação de condutores, sendo ele na sua forma pura, como em liga com outros elementos, ou associado ao aço; esse fator é devido ao bom custo benefício, se comparado aos cabos de cobre.

Os cabos mais empregados em linha de transmissão são: CAA (Cabo de Alumínio com Alma Aço) ou ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) e CA (Cabos de Alumínio) ou ACC (All Aluminum Conductor) (SINGH, 2009). De forma geral os cabos são denominados pela sua formação e sua bitola. A bitola pode ser dada em MCM (mil circulares mil), que corresponde a área apenas do alumínio no cabo. Um CM (circular mil) é equivalente a $6,4516 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$.

2.3.3 Cabos de guarda ou para-raios

Os cabos de guarda ou para-raios das linhas aéreas de transmissão de energia, possuem a função de interceptar as descargas atmosféricas evitando que atinjam os cabos condutores. Fatores como, elevadas resistências de aterramento das torres, torres de altura elevada e vãos de longo comprimento podem propiciar falhas na isolação no que refere-se a ocorrência de descargas. Segundo Siemens (2007), os resultados frequentes são breves interrupções, ou mesmo curtos-circuitos entre as fases do sistema.

De acordo com Brittes *et al.* (2001), descargas atmosféricas são a principal causa de desligamento de linhas de transmissão, o que gera distúrbio na distribuição e no fornecimento do produto (energia elétrica) aos consumidores (residencial, laboral ou industrial), acarretando em muitos casos perda de faturamento. Segundo Singh (2009) os tipos de cabos para-raios mais empregados são: cordoalha de fios de aço zincada, cabos CAA extrafortes e cabos de aço-alumínio.

2.4 NORMAS TÉCNICAS

2.4.1 NBR 8800 (2008) – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios

Esta Norma, baseia-se no método dos estados-limites, estabelecendo os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto de estruturas com perfis de aço laminados ou soldados, ou de seção tubular com ou sem costura e nas ligações quer sejam executadas com parafusos ou soldas.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), o estado limite ocorre quando a estrutura não satisfaz mais um de seus objetivos, seja manter a sua estabilidade, seja gerar conforto e segurança para seus usuários. A NBR 8800 (2008) prescreve dois tipos de estados limites: estado limite de serviço e estado limite último. Conforme Fakury (2006), a mesma foi cuidadosamente adaptada à realidade brasileira, tratando com consciência situações comuns em nosso país, que não têm paralelo em outros lugares.

2.4.1.1 Especificações técnicas de dimensionamento à tração

De acordo com a NBR 8800 (2008) o dimensionamento de barras tracionadas deve obedecer a expressão 5. Pfeil e Pfeil (2009) explicam que peças tracionadas são aquelas sujeitas a solicitações de tração axial ou tração simples. A força axial de tração resistente de cálculo deve ser o menor dos valores entre o escoamento da seção bruta e da ruptura da seção líquida. Por meio da equação 6 dimensiona-se o escoamento da seção bruta. A ruptura da seção líquida é calculada através da equação 7.

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (5)$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

F_y é a resistência ao escoamento do aço;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (7)$$

Onde:

A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra;

f_u é a resistência à ruptura do aço;

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação relacionado à ruptura.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009) a área líquida das barras é obtida subtraindo-se da área bruta (A_g) as áreas dos furos contidos em uma seção reta da peça. Segundo o mesmo, no caso de furação enviesadas é necessário encontrar o trajeto que terá o menor valor de seção líquida, pois a peça pode romper seguindo qualquer um desses percursos.

$$A_e = C_t \cdot A_n \quad (8)$$

Onde:

A_e é a área líquida efetiva;

C_t é o coeficiente de redução da área líquida;

A_n é a área líquida nominal da barra.

Para a determinação da área efetiva do parafuso ou barra redonda rosqueada, para tração, a NBR 8800 (2008), enuncia que a área resistente ou área efetiva de um parafuso ou de uma barra redonda rosqueada (A_{be}), para tração, é um valor compreendido entre a área bruta e a área da raiz da rosca, conforme as equações a seguir. A NBR 8800 recomenda que o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente (L/r), não seja superior a 300.

$$A_{be} = 0,75 \cdot A_b \quad (9)$$

$$A_b = 0,25 \cdot \pi \cdot d_b^2 \quad (10)$$

Onde:

A_{be} é a área efetiva;

A_b é a área bruta;

d_b é o diâmetro externo da rosca da barra redonda rosqueada.

2.4.1.2 Especificações técnicas dimensionamento à compressão

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), os esforços de compressão tende a acentuar o efeito de curvatura inicial existente. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por flambagem por flexão, que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça. A NBR 8800 (2008) prescreve que para o dimensionamento de peças submetidas a forças axiais de compressão deve-se atender a seguinte expressão:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (11)$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo.

A orientação da NBR 8800 (2008), é que para a determinação da força axial de compressão resistente de cálculo, de uma barra, associadas aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão seguinte:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{al}} \quad (12)$$

Onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q é o fator de redução total associado à flambagem local;

A_g é a área bruta da seção transversal da barra.

O índice de esbeltez das barras comprimidas, de acordo com a NBR 8800 (2008), são tomadas como a maior relação do produto do coeficiente de flambagem e do comprimento destravado dividido pelo raio de giração. O resultado não pode ser superior a 200 (Equação 13). A flambagem é um fenômeno que ocorre em peças esbeltas quando submetidas a um carregamento de compressão axial, e é considerado um fenômeno de instabilidade. Deste modo, a peça pode perder sua estabilidade sem atingir a tensão de escoamento (BRAÇAL *et al.*, 2012). Pfeil e Pfeil (2009) explica que a força axial de flambagem elástica representa a carga de compressão máxima em que ainda é possível manter a configuração retilínea da estrutura sem que ocorra o efeito de flambagem.

$$\frac{K \cdot L}{r} \leq 200 \quad (13)$$

Onde:

K é o coeficiente de flambagem;

L é o comprimento destravado;

r é o raio de giração.

A força axial resistente de flambagem elástica é definida em verificação para situações de flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal, para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal e para a flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal z (CHAMBERLAIN *et al.*, 2013).

2.4.2 NBR 8850 (2003) – Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento

A norma NBR 8850 (1985) foi cancelada no ano de 2013 pela ABNT por falta de uso no setor elétrico. Vale ressaltar que a NBR 8850 (1985) foi atualizada em 2003, utilizando como base a norma americana ASCE 10 (1997), no entanto, a mesma não foi homologada pela ABNT, contudo ainda hoje a NBR 8850 (2003) é utilizada por alguns profissionais do setor devido a

semelhança com a norma americana. Esta norma tem por finalidade apresentar diretrizes e critérios gerais, dados e métodos que devem ser seguidos no projeto e fabricação de suportes metálicos treliçados, galvanizados, constituídos de perfis de aço laminados aparafusados, destinados à montagem de linhas de transmissão, de acordo com a metodologia dos estados limites e critérios probabilísticos de confiabilidade.

As disposições desta norma aplicam-se a perfis laminados a quente. Em casos específicos, poderão ser utilizados perfis de chapa dobrada a frio e, eventualmente, perfis soldados. Não é permitida a utilização de barras chatas e tubos como peças estruturais de suportes metálicos treliçados. A mesma, expõe as espessuras mínimas que devem ser adotadas:

- a) Estruturas = 3 mm ou 1/8”;
- b) Fundações em grelhas = 5 mm ou 3/16”;
- c) “*Stubs*” = no mínimo igual à espessura do montante;
- d) Chapas de ligação = a espessura mínima não pode ser inferior à espessura da barra que está sendo conectada.

A NBR 8850 (1985) relata o dimensionamento estrutural que deve ser realizado mediante a aplicação da metodologia dos Estados Limites. Portanto, os suportes são verificados tanto para condições definidas para Estados Limites Últimos quanto para Estados Limites de Utilização. Para Estados Limites Últimos, o suporte deve ser dimensionado para resistir às solicitações causadas pelas cargas de projeto atuantes. Nestas condições, a seguinte inequação deve ser satisfeita:

$$S_d \leq R_d \quad (14)$$

Onde:

S_d representa as solicitações de cálculo atuantes nos diferentes elementos do suporte, obtidas através da análise estrutural quando submetido aos carregamentos especificados;

R_d representa a resistência de cálculo do suporte, obtida através da aplicação do fator de resistência Φ_R sobre a resistência limite R_k de cada elemento estrutural, conforme segue:

$$R_d = \Phi_R \cdot R_k \quad (15)$$

Onde:

R_k representa a resistência limite do suporte, obtida em função da tensão característica ou da flambagem das barras críticas do suporte;

Φ_R é o fator de resistência que minora a resistência limite do suporte ou dos seus elementos, para a obtenção da resistência de cálculo do mesmo.

Para dimensionamento ou verificação dos diferentes elementos de suportes com configuração geométrica usual, para Estados Limites Últimos, devem ser utilizados os seguintes fatores de minoração da resistência limite (ou característica):

a) Para suporte projetado e testado através de protótipo conforme NBR 8842: $\Phi_R = 0,93$;

b) Para suporte projetado sem teste de protótipo:

$\Phi_R = 0,90$ para suportes de suspensão;

$\Phi_R = 0,85$ para suportes de ancoragem e especiais.

NOTA: Conforme a norma IEC (International Electrotechnical Commission) 60826, o fator de minoração da resistência limite é dado pela expressão:

$$\Phi_R = \Phi_N \cdot \Phi_S \cdot \Phi_Q \cdot \Phi_C \quad (16)$$

Onde:

Φ_N é o fator de resistência devido ao número de componentes sujeitos ao carregamento de máxima intensidade;

Φ_S é o fator de resistência devido à coordenação de resistência;

Φ_Q é o fator de resistência devido à qualidade de fabricação e montagem;

Φ_C é o fator de resistência relacionado à resistência característica R_k .

NOTA: No valor de Φ_R recomendado, já estão considerados os valores parciais dos fatores Φ_N , Φ_S , Φ_Q e Φ_C .

Os suportes devem ser dimensionados ou verificados para satisfazer às condições específicas dos Estados Limites de Utilização, devendo, além de resistir às cargas aplicadas, apresentar desempenho satisfatório durante a vida útil da linha de transmissão sem danos ou defeitos que possam comprometer o seu desempenho, durabilidade ou impacto visual. Desta forma, a verificação dos suportes quanto a deformações permanentes é uma condição considerada necessária.

A deformação transversal ou longitudinal de um suporte submetido a carregamento permanente, definido como um Estado Limite de Utilização, não deve ser superior a $H/100$, onde H é a altura total do suporte. O carregamento permanente é geralmente aquele oriundo da condição EDS, que apresenta temperatura média e sem efeito do vento. Nesta condição, além do peso próprio do suporte e dos cabos, devem ser considerados a componente transversal dos cabos em suportes utilizados em deflexões, desequilíbrios longitudinais em suportes de ancoragem e eventuais desequilíbrios verticais. Esta análise de deformação não se aplica aos cabos da armação dos suportes tipos “*chainette*” e “*cross-rope*”.

2.4.2.1 Especificações técnicas do dimensionamento à compressão

A solicitação de cálculo S_{dc} atuando em uma barra deve ser menor ou igual à resistência de cálculo R_{dc} desta barra, ou seja:

$$S_{dc} \leq R_{dc} \quad (17)$$

Sendo:

$$R_{dc} = \Phi_R \cdot F_c \cdot A_g [\text{daN}] \quad (18)$$

Onde:

Φ_R é o fator de minoração da resistência limite;

A_g é a área bruta da seção transversal do perfil, em cm^2 ;

F_c é a tensão limite de compressão, em daN/cm^2 .

A tensão limite de compressão F_c atuando na área bruta da seção transversal das barras submetidas a um carregamento axial de compressão deve ser:

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{k.L/r}{C_C} \right)^2 \right] F_y \quad \text{Se } (k.L)/r \leq C_C \quad (19)$$

$$F_c = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k \cdot L / r)^2} \quad \text{Se } (k \cdot L) / r \leq C_C \quad (20)$$

Com:

$$C_C = \pi(2E/F_y)^{1/2} \quad (21)$$

Onde:

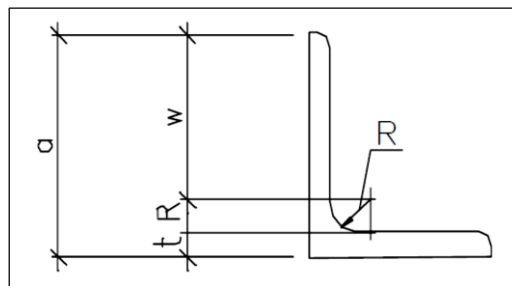
F_y é a tensão limite de escoamento do aço, em daN/cm²;

E é o módulo de elasticidade longitudinal, em daN/cm² (valor de referência: 2,0.10⁶ daN/cm²);

$(k \cdot L) / r$ é a esbeltez efetiva.

A tensão limite de compressão para cantoneiras (F_{cr}) depende da compacidade (w/t) das mesmas (flambagem local). Na figura 11, representa-se as dimensões da cantoneira.

Figura 11 - Dimensões da cantoneira.



Fonte: NBR 8850 (1985).

Onde:

α é a largura da aba;

t é a espessura da cantoneira;

R é o raio de laminação; e

$w = (\alpha - t - R)$ é a largura plana da aba.

Neste caso, nas fórmulas de F_c e C_c da tensão limite de compressão, o valor de F_y deve ser substituído por F_{cr} , conforme segue abaixo, sendo que w/t não deve exceder a 25:

$$\text{Se } \frac{w}{t} \leq \left(\frac{w}{t}\right)_{lim} \quad F_{\sigma} = F_y \text{ (cantoneiras compactas)} \quad (22)$$

$$\text{Se } (w/t)_{lim} < \frac{w}{t} \leq 0,846 \left(\frac{E}{F_y}\right)^{1/2} \quad F_{\sigma} = [1,677 - 0,677 (w/t)/(w/t)_{lim}] F_y \quad (23)$$

$$\text{Se } \frac{w}{t} > 0,846 \left(\frac{E}{F_y}\right)^{1/2} \quad F_{\sigma} = 0,3276.E/(w/t)^2 \quad (24)$$

Onde:

$$(w/t)_{lim} = 0,470(E/F_y)^{1/2} \quad (25)$$

A esbeltez efetiva ($k.L/r$) é a relação entre o comprimento de flambagem L e o raio de giração r , multiplicado pelo coeficiente de comprimento efetivo k . Para o cálculo da esbeltez efetiva devem ser observadas as condições de aplicação das cargas (excêntrica e concêntrica) e as condições de extremidade da barra, como a seguir.

a) Esbeltez efetiva de montantes aparafusados em ambas as abas:

$$\text{Se } 0 \leq L/r \leq 150; k.L/r = L/r \quad (26)$$

b) Esbeltez efetiva de demais barras comprimidas:

– Barras com cargas concêntricas em ambas as extremidades:

$$\text{Se } 0 \leq L/r \leq 120; k.L/r = L/r \quad (27)$$

– Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra:

$$\text{Se } 0 \leq L/r \leq 120; k.L/r = 30 + 0,75 L/r \quad (28)$$

– Barras com cargas excêntricas em ambas as extremidades:

$$\text{Se } 0 \leq L/r \leq 120; k.L/r = 60 + 0,5 L/r \quad (29)$$

– Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\text{Se } 120 \leq L/r \leq 200; k.L/r = L/r \quad (30)$$

– Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades:

$$\text{Se } 120 \leq L/r \leq 225; k.L/r = 28,6 + 0,762 L/r \quad (31)$$

– Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\text{Se } 120 \leq L/r \leq 250; k.L/r = 46,2 + 0,615 L/r \quad (32)$$

c) A esbeltez efetiva definida não deve exceder aos seguintes valores:

– Montantes: $k.L/r \leq 150$ (33)

– Outras barras comprimidas: $k.L/r \leq 200$ (34)

2.4.2.2 Especificações técnicas dimensionamento à tração

A solicitação de cálculo S_{dt} , atuando em uma barra, deve ser menor ou igual a resistência de cálculo R_{dt} desta barra, ou seja:

$$S_{dt} \leq R_{dt} \quad (35)$$

$$R_{dt} = \Phi_R \cdot A_n \cdot F_t \text{ [daN]} \quad (36)$$

Onde:

Φ_R é o fator de minoração da resistência limite;

A_n é a área líquida da seção transversal;

F_t é a tensão limite de tração, em daN/cm², conforme especificado a seguir.

Para solicitação à tração atuando concentricamente na barra:

$$F_t = F_Y \quad (37)$$

Para solicitação à tração em cantoneiras conectadas somente por uma aba:

$$F_t = 0,9 \cdot F_Y \quad (38)$$

Onde:

F_Y é a tensão limite de escoamento do aço, em daN/cm².

NOTA: Para cantoneiras de abas desiguais conectadas na menor aba, deve ser considerada a aba não conectada com a mesma largura da aba menor.

A área líquida de barras tracionadas deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$A_n = A_g - n \cdot d_f \cdot t + \left[\sum \left(\frac{S^2}{4 \cdot g} \right) \right] \cdot t \quad [\text{cm}^2] \quad (39)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal do perfil [cm²];

n é a quantidade de furos;

d_f é o diâmetro do furo = $d_p + 0,3$ cm;

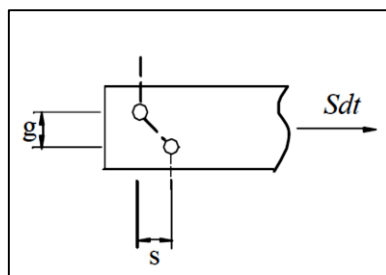
d_p é o diâmetro nominal do parafuso [cm];

t é a espessura do perfil da barra tracionada [cm];

S são as distâncias entre furos na direção paralela ao esforço em cm, conforme a figura 12;

g são as distâncias entre furos na direção perpendicular ao esforço em cm, como pode-se observar na figura 12.

Figura 12 - Distância entre furos.



Fonte: NBR 8850 (1985).

As barras de contraventamentos devem ter uma resistência de cálculo à compressão R_{dc} para suportar no mínimo 2,5% da máxima sollicitação de cálculo S_{dc} atuante na barra principal contraventada, independentemente da inclinação e do número de barras de contraventamento que chegam no mesmo ponto. A esbeltez não deve exceder aos seguintes valores:

- a) Para barras sempre tracionadas: $L/r \leq 375$;
- b) Para barras tracionadas que podem ficar sem sollicitação de tração sob certas condições de carregamento: $L/r \leq 250$.

2.4.3 NBR 5422 (1985) – Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica

Os critérios e procedimentos apresentados pela NBR 5422 (1985) fixa condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima, acima de 38 kV e não superior a 800 kV, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas. Primeiramente, é calculada a pressão dinâmica

de referência (q_0) para obter esforços aplicados nos cabos, cadeias de isoladores e suportes. Para tanto, tem-se:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (40)$$

Onde:

ρ é a massa específica do ar, em kg/m^3 ;

V_p é a velocidade do vento de projeto, em m/s .

O valor da massa específica do ar e da velocidade do vento de projeto são dadas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \left(\frac{16000 + 64 \cdot t - ALT}{16000 + 64 \cdot t + ALT} \right) \quad [\text{kg/m}^3] \quad (41)$$

Onde:

t é a temperatura coincidente, em $^\circ\text{C}$;

ALT é a altitude média da região de implantação da linha, em metros.

$$V_p = K_f \cdot K_d (H/10)^{1/n} \cdot V_b \quad [\text{m/s}] \quad (42)$$

Onde:

K_f é o coeficiente de rugosidade do terreno, conforme a tabela 1;

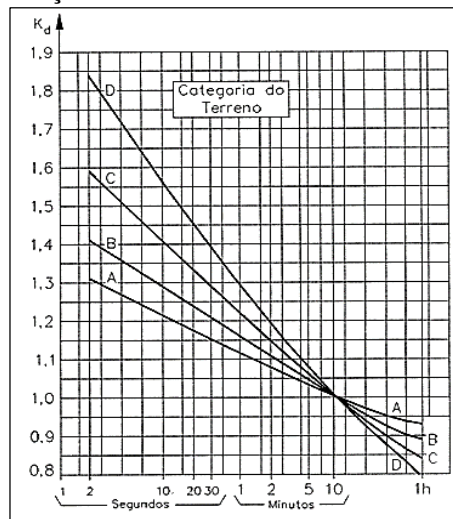
Tabela 1 - Coeficiente de rugosidade do terreno.

Categoria do terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade K_r
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Fonte: NBR 5422 (1985).

K_d é o coeficiente de correção do período de integração (t). É a relação entre as velocidades médias a dez metros de altura e sua obtenção é feita com a utilização da figura 13 para os diferentes períodos de integração e rugosidade de terrenos.

Figura 13 - Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura.



Fonte: NBR 5422 (1985).

Onde:

H é a altura do elemento em estudo sobre o nível do terreno;

n é o coeficiente de correção da velocidade do vento em função da altura (H). O valor irá depender da categoria do terreno e do período de integração (t) e poderá ser obtido com a utilização da tabela 2;

V_b é a velocidade básica do vento. É a velocidade de uma rajada, referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 metros de altura do solo, com período de integração de 10 minutos e medida em um terreno com grau de rugosidade (B). Com a figura 14 pode-se obter (V_b) em qualquer ponto no Brasil.

Figura 14 - Velocidade básica do vento no Brasil [m/s].



Fonte: NBR 5422 (1985).

Tabela 2 - Valores de (n) para Correção da Velocidade do Vento em função da Altura.

Categoria do terreno	(n)	
	t = 2 segundos	t = 30 segundos
A	13,0	12,0
B	12,0	11,0
C	10,0	9,5
D	8,5	8,0

Fonte: NBR 5422 (1985).

O esforço decorrente da ação do vento sobre os cabos em um vão de comprimento Z, aplicado perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação a cada suporte deste vão, é dado pela fórmula a seguir:

$$A_c = q_0 \cdot C_{xc} \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{Z}{2} \cdot \text{sen}^2 \theta \quad [N] \quad (43)$$

Onde:

q_0 é a pressão dinâmica de referência;

C_{xc} é o coeficiente de arrasto, igual a 1,0;

α é o fator de efetividade, adimensional;

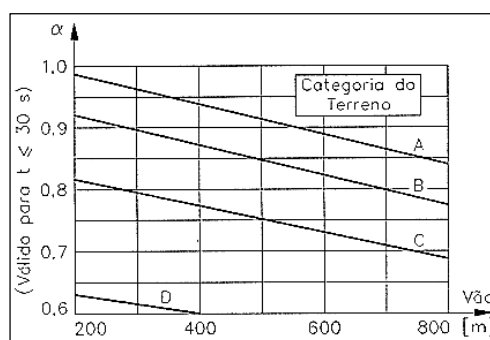
d é o diâmetro do cabo, em metros;

Z é o comprimento do vão considerado, em metros;

θ é o ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão.

O fator de efetividade (α) deve ser determinado a partir da figura 15. O esforço total sobre um feixe de cabos condutores será igual à soma dos efeitos sobre cada sub-condutor do feixe sem considerar qualquer efeito de blindagem. A velocidade de projeto deve ser corrigida para a altura média dos cabos ao longo do vão.

Figura 15 - Fator de efetividade (α).



Fonte: NBR 5422 (1985).

O esforço decorrente da ação do vento sobre os isoladores, aplicado na direção do vento no ponto de suspensão da cadeia de isoladores, é dado pela equação 44. A velocidade do vento deve ser corrigida para a altura do centro de gravidade da cadeia de isoladores.

$$A_i = q_0 \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad [\text{N}] \quad (44)$$

Onde:

q_0 é a pressão dinâmica de referência;

C_{xi} é o coeficiente de arrasto, igual a 1,2;

S_i é a área de cadeia de isoladores, projetada ortogonalmente sobre um plano vertical, em m^2 .

Para determinar o esforço devido à ação direta do vento sobre o suporte, atuando na direção do vento, o suporte é decomposto em troncos de comprimento inferior a 10 metros. A velocidade do vento deve ser corrigida para a altura do centro de gravidade de cada tronco. Para suportes metálicos treliçados de seção transversal retangular, o esforço devido à ação do vento aplicada nos centros de gravidade é dado pela fórmula:

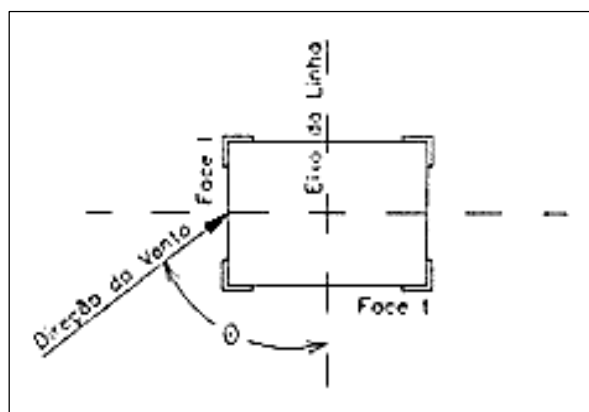
$$A_t = q_0(1 + 0,2 \cdot \text{sen}^2 2\theta)(S_{T1} \cdot C_{xT1} \cdot \text{sen}^2 \theta + S_{T2} \cdot C_{xT2} \cdot \text{cos}^2 \theta) \quad [\text{N}] \quad (45)$$

Onde:

q_0 é a pressão dinâmica de referência;

θ é o ângulo de incidência do vento, conforme a figura 16;

Figura 16 - Ação do vento sobre um tronco de suporte.

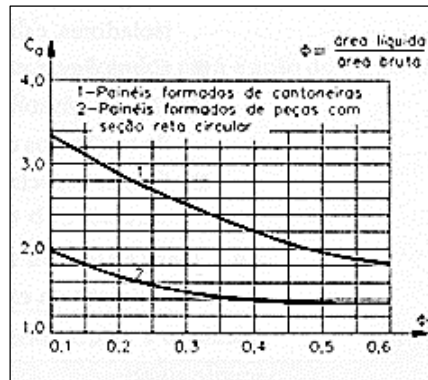


Fonte: NBR 5422 (1985).

S_{T1} , S_{T2} é a área líquida total de uma face projetada ortogonalmente sobre plano vertical situado na direção das faces 1 e 2, respectivamente, em m²;

C_{XT1} , C_{XT2} é o coeficiente de arrasto próprio das faces 1 e 2, para um vento perpendicular a cada face, tomado conforme a figura 17, que já leva em conta as faces a sotavento e à barlavento.

Figura 17 - Coeficiente de arrasto para painéis de suporte treliçados.



Fonte: NBR 5422 (1985).

2.4.4 ASCE 10 (1997) – Design of Latticed Steel Transmission Structures

A Norma Projeto de Estruturas Metálicas Treliçadas para Linhas de Transmissão especifica os requisitos para o projeto, fabricação e testes de membros e conexões para estruturas de transmissão de energia elétrica. Estes requisitos são aplicáveis a formas de aço laminados a quente e dobrados a frio, dispostos à montagem de linhas de transmissão, de acordo com a método dos estados limites e critérios probabilísticos de confiabilidade, especificado nesta norma.

As cargas consideradas no projeto devem ser determinadas pelo cliente e indicado nas especificações do trabalho, quer como árvores de carregamento ou em forma de tabela. Essas cargas de projeto devem considerar os níveis mínimos legislados, as condições climáticas esperadas, as disposições sobre a segurança da linha e as operações de construção e manutenção.

2.4.4.1 Especificações técnicas dimensionamento à compressão

Para o dimensionamento à compressão, a ASCE 10 (1997) especifica espessura mínima de 3 mm para membros da estrutura e 5 mm para fundações em grelha. Sendo o limite

dos coeficientes de esbeltez para os membros que carregam tensão de compressão, igual a: membros de pernas (montantes): $L/r \leq 150$; outros membros: $KL/r \leq 200$. O índice de esbeltez KL/r para os membros secundários não deve exceder 250.

Os membros com índice de esbeltez maior que 300 não suportam as solicitações de compressão, portanto, os membros que sofrem ação conjunta de tração e compressão não devem exceder esse limite. O índice de esbeltez L/r para membros que carregam somente tensão de tração deverão ser superiores a 300 e inferiores ou igual a 500. A tensão limite de compressão F_a atuando na área bruta transversal dos membros submetidos a um carregamento axial de compressão deve ser:

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (46)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad \frac{KL}{r} \geq C_c \quad (47)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (48)$$

Onde:

F_y é a tensão de escoamento;

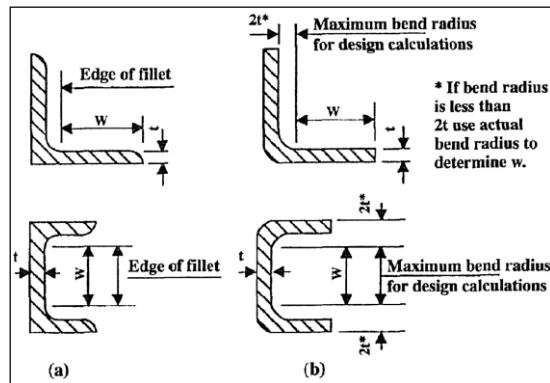
E é o módulo de elasticidade;

L é o comprimento de flambagem;

r é o raio de giração;

K é o coeficiente do comprimento efetivo.

A tensão limite de compressão para cantoneiras depende da compactidade (w/t) das mesmas, veja a figura 18. Assim sendo, nas equações de F_a e C_c da tensão limite de compressão, o valor de F_y deve ser substituído por F_{er} , conforme as equações abaixo, sendo que w/t não deve exceder 25. Para as equações 52 à 55, $\Psi = 1$ para F_y em ksi e 2,62 para F_y em MPa.

Figura 18 - Determinação de índice w/t .

Fonte: ASCE 10 (1997).

$$F_{er} = \left[1.677 - 0.677 \frac{w/t}{(w/t)_{lim}} \right] F_y \quad (49)$$

$$\left(\frac{w}{t} \right)_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (50)$$

$$F_{er} = \frac{0.0332\pi^2 E}{(w/t)^2} \quad \frac{w}{t} > \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (51)$$

$$\left(\frac{w}{t} \right)_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{80\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (52)$$

A esbeltez efetiva (KL/r) é a relação entre o comprimento de flambagem L e o raio de giração r , multiplicado pelo coeficiente de comprimento efetivo K . Para calcular a esbeltez efetiva, deve-se observar as condições de aplicação das cargas (excêntricas e concêntricas) e as condições e extremidade da barra, como a seguir:

a) Para esbeltez efetiva de montantes aparafusados em ambas as abas:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r} \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 150 \quad (53)$$

b) Para esbeltez efetiva de demais barras comprimidas com cargas concêntricas em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r} \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (54)$$

- Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra:

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0,75 \frac{L}{r} \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (55)$$

- Barras com cargas excêntricas em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0,5 \frac{L}{r} \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (56)$$

- Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 200 \quad (57)$$

- Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 28,6 + 0,762 \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 225 \quad (58)$$

- Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 46,2 + 0,615 \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250 \quad (59)$$

- c) A esbelteza efetiva de barras secundárias não deve exceder aos seguintes valores:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r} \quad 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (60)$$

- Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250 \quad (65)$$

- Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 28,6 + 0,762 \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 290 \quad (61)$$

- Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 46,2 + 0,615 \frac{L}{r} \quad 120 \leq \frac{L}{r} \leq 330 \quad (62)$$

As limitações L/r especificadas acima normalmente garantem que as barras secundárias são adequadas para fornecer suporte para o membro estressado. A prática comum é a concepção de contraventamento de 1 a 2,5% da carga do membro suportado.

2.4.4.2 Especificações técnicas dimensionamento à tração

A solicitação de tração F_t atuando concentricamente na barra será $F_t = F_y$. Para solicitação à tração em cantoneiras conectadas a penas por uma aba, F_t será $0.9F_y$. Se a cantoneira apresentar abas desiguais conectadas na menor aba, deve ser considerada a aba não conectada com a mesma largura da aba menor. Se o parafuso na perna conectada está fora do centro de gravidade do ângulo, a conexão deve ser verificada a ruptura (também chamado de cisalhamento bloco) por:

$$P = 0.60 \cdot A_u \cdot F_u + A_t \cdot F_y \quad (63)$$

Onde:

P é a solicitação de tração na conexão;

F_y é a tensão limite de escoamento do aço;

F_u é a tensão limite de ruptura à tração da chapa ou do parafuso;

A_u é a área útil mínima em cisalhamento ao longo de uma linha de força transmitida;

A_t é a área líquida mínima em tensão a partir do furo para a ponta do ângulo perpendicular à linha de força.

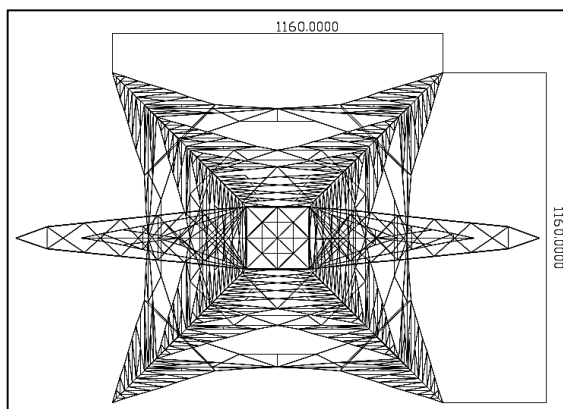
3 METODOLOGIA CIENTÍFICA

O dimensionamento comparativo entre a NBR 8800 (2008) e a ASCE 10 (1997) foi realizado em um suporte de linha de transmissão de alta tensão (AT) de 230 kV de circuito duplo com seis cabos CAA. A estrutura selecionada para este suporte é uma torre treliçada autoportante, pois é a mais utilizada devido à facilidade de transporte e velocidade de instalação e por apresentarem menor necessidade de área para instalação e menores custos de manutenção. Foi considerada uma estrutura de suspensão em alinhamento reto com dois vãos adjacentes de condutores e para raios em nível, suspensos por torres de mesmo nível e perfil. A localização admitida para o dimensionamento foi a região Sudeste do Pará, na cidade Tucuruí. Segundo o *site* organizacional Climate (2015), a altitude em referência ao nível do mar da cidade de Tucuruí é 46 m e a temperatura média 27,4 °C.

3.1 GEOMETRIA, MATERIAL, SEÇÕES E LIGAÇÕES ENTRE BARRAS

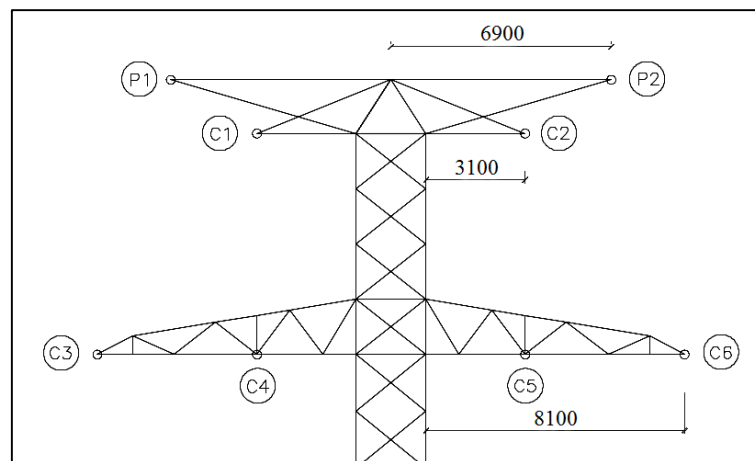
Os Suportes de Linha de Transmissão de Energia Elétrica podem ter várias configurações em planta e em altura. Geralmente, as torres de distribuição de energia são estruturas treliçadas de base quadrangular e/ou retangular, compostas por elementos de parede fina, cantoneiras ou tubos metálicos. A torre que se pretende estudar foi dimensionada para utilização numa zona com clima equatorial quente úmido, e apoio numa superfície de solo bastante íngreme. Como pode-se observar na figura 19, a torre tem base quadrangular de largura igual a 11.600 mm, sendo a altura máxima da torre igual a 50.700 mm e o vão entre as torres de é de 450 metros.

Figura 19 - Vista superior da torre (dimensões em cm).



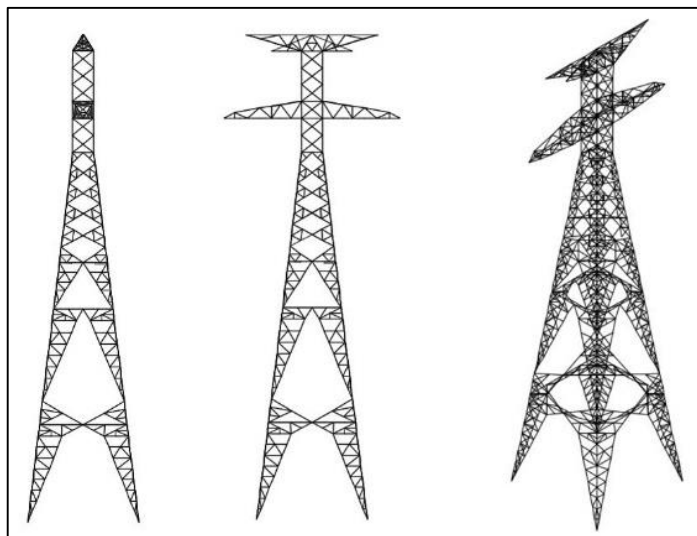
A torre possui oito pontos de apoios para as linhas de distribuição, sendo seis pontos para cabos condutores de linhas elétricas e dois pontos para cabos para-raios. Seis pontos localizam-se nas extremidades das mísulas e os outros dois no meio da mísula inferior. Os braços inferiores têm comprimento máximo de 8.100 mm, os intermediários têm comprimento máximo de 3.100 mm e os superiores têm comprimento máximo de 6.900 mm (Figura 20).

Figura 20 - Comprimento e configuração dos braços da torre (dimensão em mm).



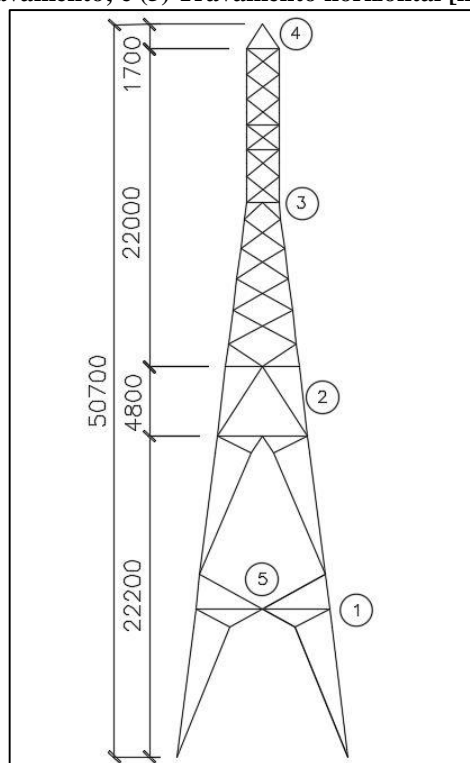
A largura da forma quadrangular vai decrescendo em altura até atingir o valor 2200 mm à altura de 38400 mm, acima deste valor, a forma quadrangular mantém-se na mesma largura. No braço superior, a largura da torre diminui até se anular. O aspecto geral da torre é visível na figura 21.

Figura 21 – Elevações e perspectivas da torre.



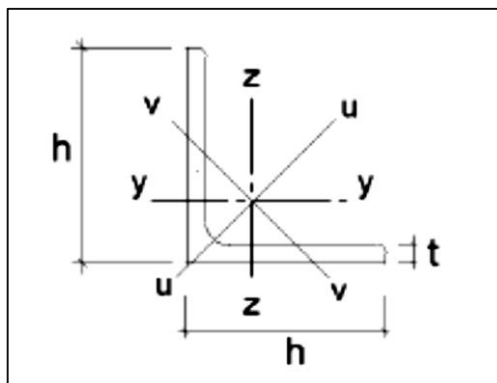
A estrutura treliçada apresenta sete tipos de travamentos. No primeiro módulo, que corresponde ao número 1 na figura 22, cada painel possui travamento vertical em forma de Y. No segundo módulo, que corresponde ao número 2 na figura abaixo, o travamento vertical do painel é realizado em forma de K. No terceiro módulo, que corresponde ao número 3 da figura 22, o travamento de cada painel é feito apenas por barras diagonais. No topo da torre, que corresponde ao número 4 na figura a seguir, não apresenta travamentos. Adicionalmente, encontram-se sete travamentos horizontais, que corresponde ao número 5 na figura abaixo, distribuídos ao longo da estrutura da torre. A torre possui também travamentos internos distribuídos concomitantemente aos travamentos horizontais.

Figura 22 - (1) Travamento em Y; (2) Travamento em K; (3) Travamento em diagonais; (4) Sem travamento; e (5) Travamento horizontal [mm].



A estrutura é constituída por perfis cantoneiras (seção L) de abas iguais, conforme a figura 23. No dimensionamento, de forma a nomear cada uma delas, empregou-se a seguinte terminologia: L indica o tipo de seção, o primeiro número é a largura das abas (h) e o segundo número representa a espessura (t), sendo todos valores em polegadas. A relação de bitolas do aço encontra-se no ANEXO 1.

Figura 23 - Configuração de perfis cantoneira.



Fonte: Dias (2007).

Os perfis cantoneira são constituídos pelo aço ASTM A36, que apresenta Limite de Escoamento (L_y) igual a 2530 kgf/cm², Limite de Ruptura (L_u) igual a 4077 kgf/cm² e Módulo de Elasticidade do aço (E) igual a 200 GPa. Os dados do mesmo encontram-se disponíveis no catálogo da GERDAU®, o mesmo respeita as considerações especificadas na Portaria nº 178 do INMETRO (2006). As ligações dos perfis são aparafusadas, porém neste trabalho, por uma questão de simplificação de cálculo, as ligações não foram dimensionadas. Adotou-se a área bruta menor ou igual à área líquida, sendo a estrutura dimensionada pela área bruta.

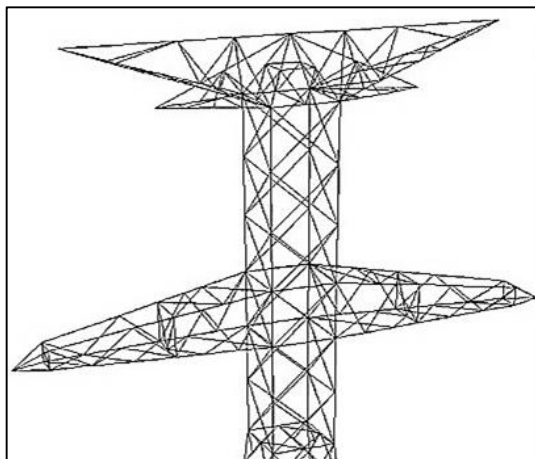
3.2 MODELAGEM DA ESTRUTURA

As torres de distribuição de energia são compostas por um alto número de barras, a sua modelagem geralmente é fundamentada em estruturas simplificadas para facilitar o dimensionamento. Segundo Gabrielli (2004), as torres de transmissão são normalmente modeladas como treliça espacial, apesar das pernas principais sugerirem que sejam modeladas com elementos de pórtico e os contraventamentos com elementos treliçados, o que implicaria em ligações rotuladas. A estrutura é composta por suporte de cabos para-raios, mísulas, montantes, bases de extensão do corpo básico, pernas, contraventamentos primários e contraventamentos secundários.

Nesse estudo, os contraventamentos secundários foram considerados, com intuito de reduzir o comprimento de flambagem dos perfis. Utilizou-se o modelo com barras bi engastadas, pois é o modelo mais realista logo que as ligações têm sempre alguma rigidez e resistência (Figura 24). Contudo, este modelo não permite qualquer liberação de esforço nas

ligações das barras, sendo que as ligações entre as barras permitem pequenas rotações não sendo por isso totalmente engastadas nem totalmente rotuladas.

Figura 24 - Modelo de barras rotuladas.

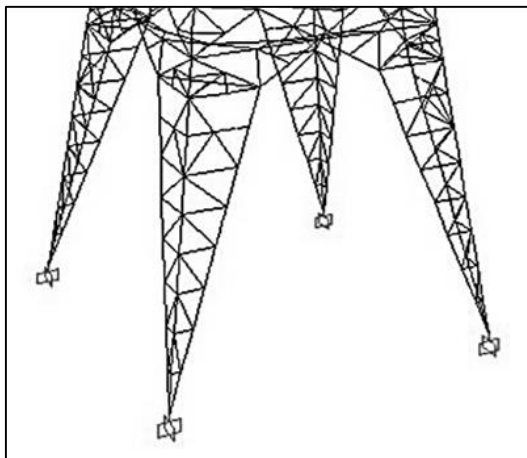


Para o dimensionamento pelas duas normas, admitiram-se os isoladores polimérico com peso próprio de 100 kgf. Cabos condutores CAA – TERN (dois cabos por fase), com diâmetro de 27010 mm, peso de 1332 kgf/m, com carga de ruptura igual a 10.000 kgf e tração máxima de 33200 N. Adotou-se cabos para-raios de aço galvanizado 3/8” EHS com diâmetro de 9,520 mm, com peso de 0,406 kgf/m, com carga de ruptura de 6.985 kgf e tração máxima de 15.900 N.

O primeiro passo para a construção do modelo foi a criação da estrutura no programa AutoCAD. Toda a estrutura foi desenhada em três dimensões, representando-se as barras por linhas no seu eixo e os nós por pontos onde convergem as barras. Para facilitar a futura introdução no programa de cálculo estrutural SAP 2000, todos os objetos do desenho foram inseridos com camada específica para cada grupo de componentes e desenhado em escala real.

Posteriormente, esse desenho foi importado para o programa SAP 2000, onde definiram-se os tipos de ligações, suportes e materiais utilizados para os perfis. Ressalta-se que em ambos dimensionamentos os apoios da torre no solo foram simulados por 4 ligações engastadas, que impedem qualquer deslocamento (Figura 25). A seguir, foram inseridas as ações do peso próprio, do vento sobre a estrutura e das forças nos cabos. Com essas ações tornou-se possível a criação de 19 hipóteses de cálculo que seriam lançadas na estrutura.

Figura 25 - Modelo adotada para os apoios.



3.3 AÇÕES CONSIDERADAS

Para o cálculo dos esforços sobre a estrutura, levou-se em consideração três tipos de ações sobre a torre, que são: peso próprio da estrutura, a vento sobre a torre e as forças dos cabos, que serão dispostos a seguir.

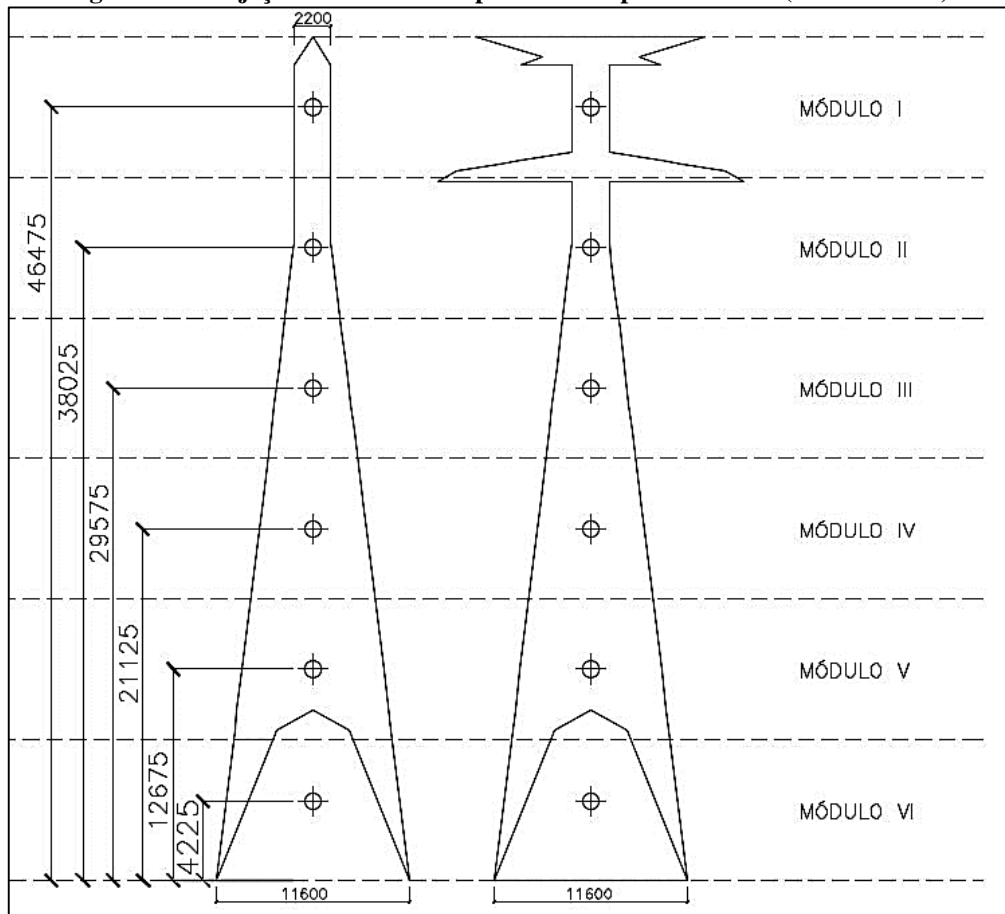
3.3.1 Peso próprio

O peso próprio da estrutura foi a primeira ação considerada. O valor desta ação é dimensionado diretamente pelo programa SAP 2000, a partir do peso específico do aço, que é $76,973 \text{ kN/m}^3$, e da geometria da seção. É uma ação do tipo permanente com atuação no sentido da ação da gravidade. Para levar em consideração os pesos de porcas, parafusos e chapas de ligação, adotou-se um acréscimo de 5% ao peso da estrutura.

3.3.2 Vento

A segunda ação considerada foi a pressão dinâmica do vento sobre a torre. Para o dimensionamento da ação do vento sobre a torre utilizou-se a NBR 5422 (1985). Para encontrar a ação de vento, dividiu-se a torre em seis partes tronco-piramidais de altura inferior a 10 metros, como pode-se observar na figura 26. A velocidade de projeto deve ser calculada para o centroide de cada tronco. A região escolhida possui velocidade básica de vento de projeto igual a 20 m/s (Figura 14), medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 10 minutos.

Figura 26 - Projeção dos troncos de pirâmide no plano vertical (cotas em mm).



3.3.2.1 Ação de vento na torre

Adotou-se K_r igual a 1,0 referente à categoria B. Com o período de integração de 2 segundos para a ação de vento nos suportes, na categoria B, obtém-se K_d igual a 1,41. Deste modo, o fator n equivale a 12. Considerando a altitude em referência ao nível do mar igual a 46m e a temperatura ambiente de $27,4^\circ \text{C}$, encontra-se ρ igual a $1,169 \text{ kg/m}^3$. A tabela 3, apresenta os valores concisos das cargas para cada módulo da estrutura.

Tabela 3 – Carregamentos aplicados sobre os suportes segundo NBR 5422 (N).

Módulos	Vento transversal (0°)	Vento longitudinal (90°)	Vento a 45°
I	15.225,95	5.305,90	12.319,11
II	8.858,36	6.511,30	9.221,80
III	9.622,98	9.622,98	11.547,58
IV	10.917,77	10.917,77	13.101,33
V	10.152,84	10.152,84	12.183,40
VI	5.246,38	5.246,38	6.295,65

Para obter esses carregamentos do vento nas torres, realizou-se um pré-dimensionamento com um perfil padrão, o L2.1/2”3/16” para encontrar a área exposta à ação do vento. Após dimensionadas as torres, a ação do vento foi novamente calculada de acordo com a área exposta dos perfis obtidos para cada estrutura, como pode-se verificar nas tabelas 4 e 5. Esses carregamentos foram lançados na estrutura a fim de substituir as cargas encontradas pelo pré-dimensionamento para verificar se as mesmas suportariam tal carregamento.

Tabela 4 – Carregamento aplicado referente à ação de vento na torre, segundo a ASCE 10 (N).

Módulos	Vento transversal (0°)	Vento a 45°	Vento longitudinal (90°)
I	15.803,68	13.435,19	6.588,30
II	10.928,77	11.322,50	7.942,08
III	10.041,62	12.049,95	10.041,62
IV	11.003,50	13.204,20	11.003,50
V	10.491,24	12.589,48	10.491,24
VI	5.388,90	6.466,68	5.388,90

Tabela 5 - Carregamento aplicado referente à ação do vento na torre, segundo a NBR 8800 (N).

Módulos	Vento transversal (0°)	Vento a 45°	Vento longitudinal (90°)
I	17.269,46	14.428,69	6.778,35
II	12.109,21	12.530,96	8.775,72
III	11.678,20	14.013,84	11.678,20
IV	14.808,20	17.769,84	14.808,20
V	13.900,33	16.680,40	13.900,33
VI	7.220,75	8.664,90	7.220,75

3.3.2.2 Ação de vento nos cabos

Considerou-se K_r igual a 1,0, referente a categoria B. O tempo de integração para ação dos cabos referente a categoria B é 30 segundos, portanto obtém-se K_d igual a 1,21. O fator n , então, será igual a 11. Considerou-se a altitude em referência ao nível do mar da cidade de Tucuruí, que é igual a 46 m e a temperatura ambiente de 27,4° C. A altura para o cálculo da correção da velocidade para os cabos condutores 1 e 2 é igual a 46 metros, para os cabos condutores 3, 4, 5 e 6 é igual a 39 metros e para os cabos para-raios 1 e 2 é igual a 50,7 metros. O fator de efetividade α é igual a 0,86, de acordo com a figura 15. A tabela 6 demonstra os valores resumidos para cabos condutores e para-raios, corrigidos para suas respectivas alturas.

Tabela 6 - Carga de vento nos cabos.

Cabos	Ac (N)
Condutores 1 e 2	2.372,97
Condutores 3, 4,5 e 6	2.302,81
Para-raios 1 e 2	851,31

3.3.2.3 Ação de vento nos isoladores

Será adotado K_r igual a 1,0, referente à categoria B. Com o período de integração de 2 segundos para ação de vento nos isoladores, na categoria B, obtém-se, K_d igual a 1,41. O fator n , logo, será igual a 12. Considerando a altitude como no nível da cidade de Tucuruí Pará (ALT = 46) e temperatura ambiente de 27,4°C. A altura média dos isoladores 1 e 2 serão, de 40,45 m e 47,45 m para o isolador 3. Os isoladores apresentam comprimento de 2,9 metros e diâmetro comprimento adotado foi de 0,146 metros, resultando em uma área de 0,07m². A tabela 7 demonstra os valores resumidos para cabos isoladores.

Tabela 7 – Carga de vento nos isoladores.

Cabos	A_i (N)
Isoladores 1 e 2	140,576
Isoladores 3,4,5 e 6	136,885

3.3.3 Cabos

As forças nos cabos são simuladas como uma carga concentrada aplicada nos oito nós onde os cabos estão conectados à estrutura, como se pôde observar na figura 20. Na tabela a seguir, apresentam-se as cargas verticais, transversais e longitudinais atuantes nos pontos de fixação dos cabos condutores e para-raios. Adotou-se o vão gravante máximo de 700 metros para os cabos condutores e 750 metros para os cabos para-raios, o vão gravante mínimo de 250 metros e o vão de vento igual a 450 metros.

Tabela 8 - Solicitações nos pontos de fixação dos cabos em kgf.

Cabos	Cargas Verticais	Cargas Transversais	Cargas Longitudinais
Condutores 1 e 2	100,00	485,14	2556,40
Condutores 3, 4, 5 e 6	766,00	470,79	2556,40
Para-raios 1 e 2	101,50	85,13	1749,00

3.4 HIPÓTESES DE CÁLCULO

As hipóteses de cálculo simulam as várias interações que pode haver na estrutura entre as forças nos nós, o vento na torre e o peso próprio. Estas combinações serão introduzidas manualmente no programa SAP 2000. O programa executará em seguida o cálculo dos esforços internos com base em cada uma das combinações, restabelecendo os valores destes para cada combinação. Segundo Gabrielli (2004), as torres que apresentam função estrutural de suspensão e serão instaladas em regiões que não há incidência de neve, podem apresentar as seguintes hipóteses básicas de cálculo:

- Hipótese básica 1: Considerar os cabos intactos com vento máximo em qualquer direção; normalmente verifica-se apenas nas direções transversal, longitudinal e a 45°;
- Hipótese básica 2: Considerar a ruptura de um cabo para-raios com aplicação do vento com velocidade reduzida. As torres projetadas para suportar dois cabos para-raios, devem apresentar duas hipóteses: uma para o rompimento do cabo da esquerda e outra para o rompimento do cabo da direita;
- Hipótese básica 3: Considerar a ruptura de um cabo condutor em qualquer posição com aplicação do vento com velocidade reduzida;
- Hipótese básica 4: Cargas devido à construção.

Para esta estrutura, construiu-se sete árvores de carregamento com 19 hipóteses de cálculo no total. Na figura 27, observa-se a árvore de carregamento referente a primeira combinação de ações a aplicar na estrutura. Na primeira hipótese foi somado a carga de vento nos cabos a 90° com a carga vertical com vão gravante máximo de 700 para os condutores e 750 para os cabos para-raios, além das cargas transversais a 90° e carga do vento nos isoladores. Esta árvore de carregamento apresenta a seguinte combinação de ações: todos cabos intactos com vão gravante máximo.

Na figura 28, observa-se a segunda árvore de carregamento que simula a estrutura com vão gravante máximo, somado a carga de vento nos cabos a 90°, com carga vertical e com vão gravante máximo de 700 para os condutores e 750 para os cabos para-raios, além de cargas transversais a 90° e carga do vento nos isoladores máximo. Nesta árvore de carregamento há duas hipóteses de cálculo, que são: rompimento do cabo para-raios direito ou rompimento do cabo para-raios esquerdo com vão gravante máximo.

Figura 27 – Hipótese 1: Cabos intactos com vão gravante máximo (kgf).

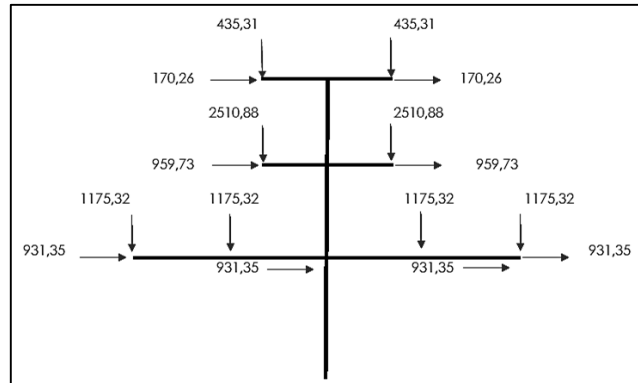
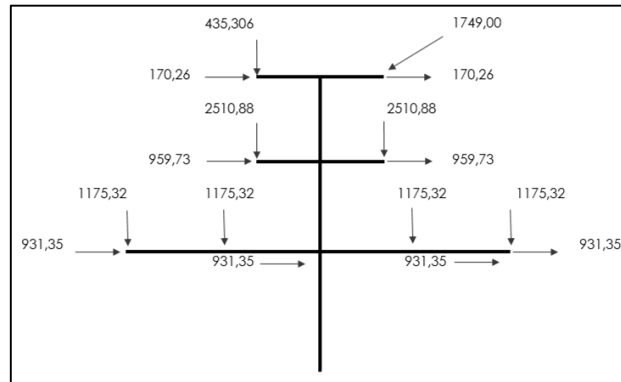
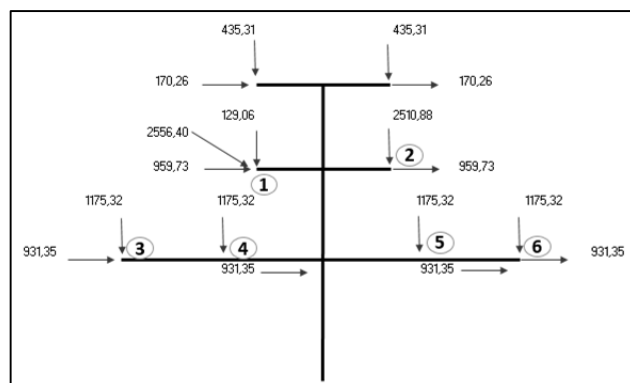


Figura 28 - Hipóteses 2a e 2b: Rompimento do cabo para-raios com vão gravante máximo (kgf).



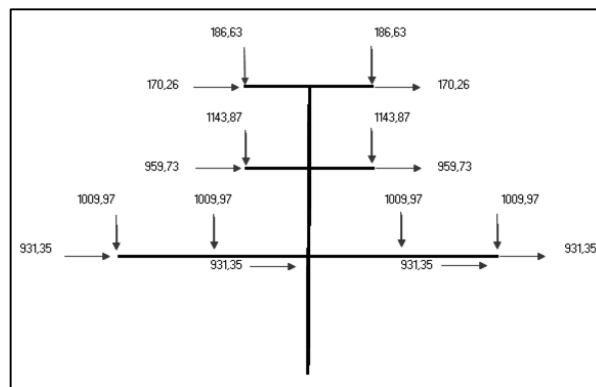
Na terceira árvore de carregamento (Figura 29), simulou-se a estrutura com vão gravante máximo somado a carga de vento nos cabos a 90° , com carga vertical e com vão gravante máximo de 700 m para os condutores e 750 m para os cabos para-raio, além das cargas transversais a 90° e das carga do vento nos isoladores máximo. Nesta árvore há seis combinações de ações, que são: rompimento de um dos seis cabos condutores com vão gravante máximo.

Figura 29 - Hipóteses 3a-f: Rompimento do cabo condutor com vão gravante máximo (kgf).



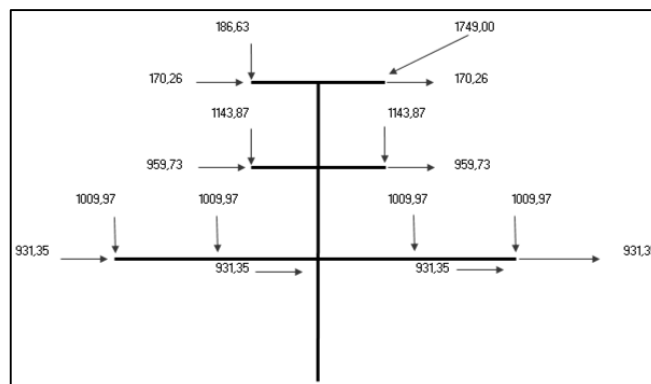
A quarta árvore de carregamento (Figura 30), simulou a estrutura com carga de vento nos cabos de 90° , somado à carga vertical com vão gravante mínimo de 250 m para os condutores e 250 m para os cabos para-raios, além das cargas transversais a 90° e a carga do vento nos isoladores. Esta árvore apresenta apenas uma combinação de cálculo, na qual todos cabos intactos e com vão gravante mínimo.

Figura 30 – Hipótese 4: Cabos intactos com vão gravante mínimo (kgf).



Na figura 31, pode-se observar a quinta árvore de carregamento, a qual simula a estrutura com carga de vento nos cabos a 90° somado à carga vertical com vento gravante mínimo de 250 m para os condutores e 250 m para os cabos para-raios, além das cargas transversais a 90° e a carga do vento nos isoladores. Esta árvore de carregamento apresenta duas hipóteses de cálculo, que são: rompimento do cabo para-raios direito ou rompimento do cabo para-raios esquerdo com vão gravante mínimo.

Figura 31 - Hipóteses 5a e 5b: Rompimento do cabo para-raios vão gravante mínimo (kgf).



Na sexta árvore de carregamento (Figura 32), simulou-se a estrutura com carga de vento nos cabos a 90° , somado à carga vertical com vento gravante mínimo de 250 m para os

condutores e 250 m para os cabos para-raio, além das cargas transversais a 90° e da carga do vento nos isoladores. Nesta árvore há seis hipóteses de cálculo, que são: rompimento de um dos seis cabos condutores com vão gravante mínimo. A sétima árvore de carregamento (Figura 33), simula a estrutura com cargas devido à construção, que são: tração dos cabos e 100 kgf de operário.

Figura 32 - Hipóteses 6a-f: Rompimento do cabo condutor com vão gravante máximo (kgf).

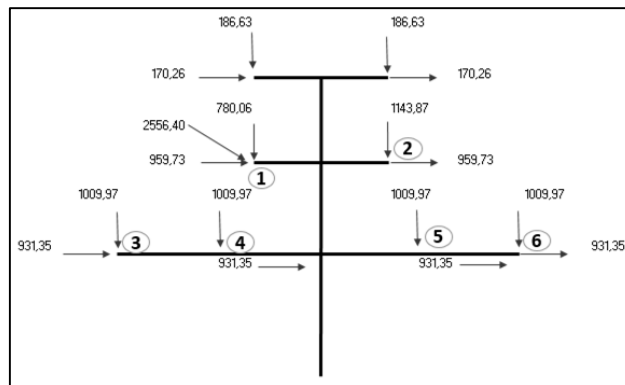
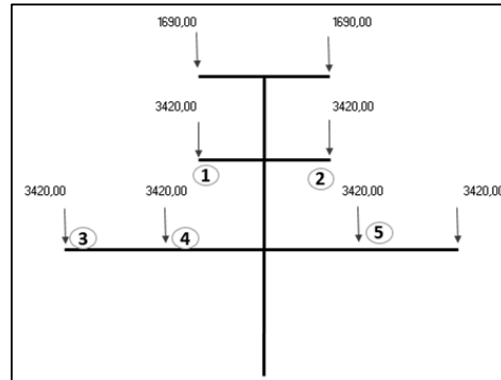


Figura 33 - Hipótese 7: Cargas devida à construção (kgf).



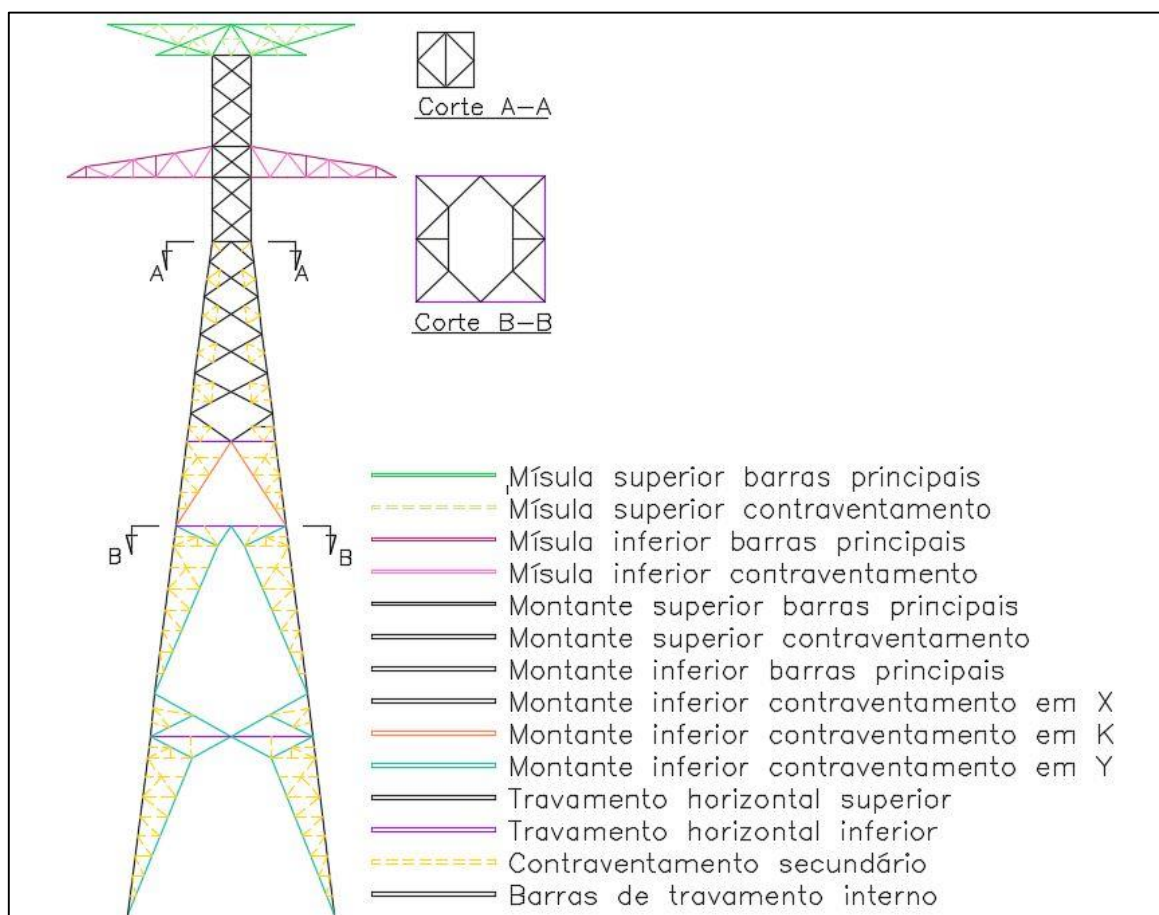
3.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS

Depois de introduzir a estrutura no programa SAP 2000, definir as forças atuantes das hipóteses de cálculo, as propriedades das seções e os tipos de ligações, a estrutura está preparada para análise por meio dos elementos finitos. Depois este modelo foi duplicado para que se pudesse efetuar o dimensionamento pelas duas normas, a ASCE 10 (1997) e a NBR 8800 (2008). Após a elaboração da estrutura no programa SAP 2000, extraíram-se as solicitações

presentes na estrutura para realizar o dimensionamento por meio do programa Microsoft Office Excel 2013 com formulas inseridas pelos autores.

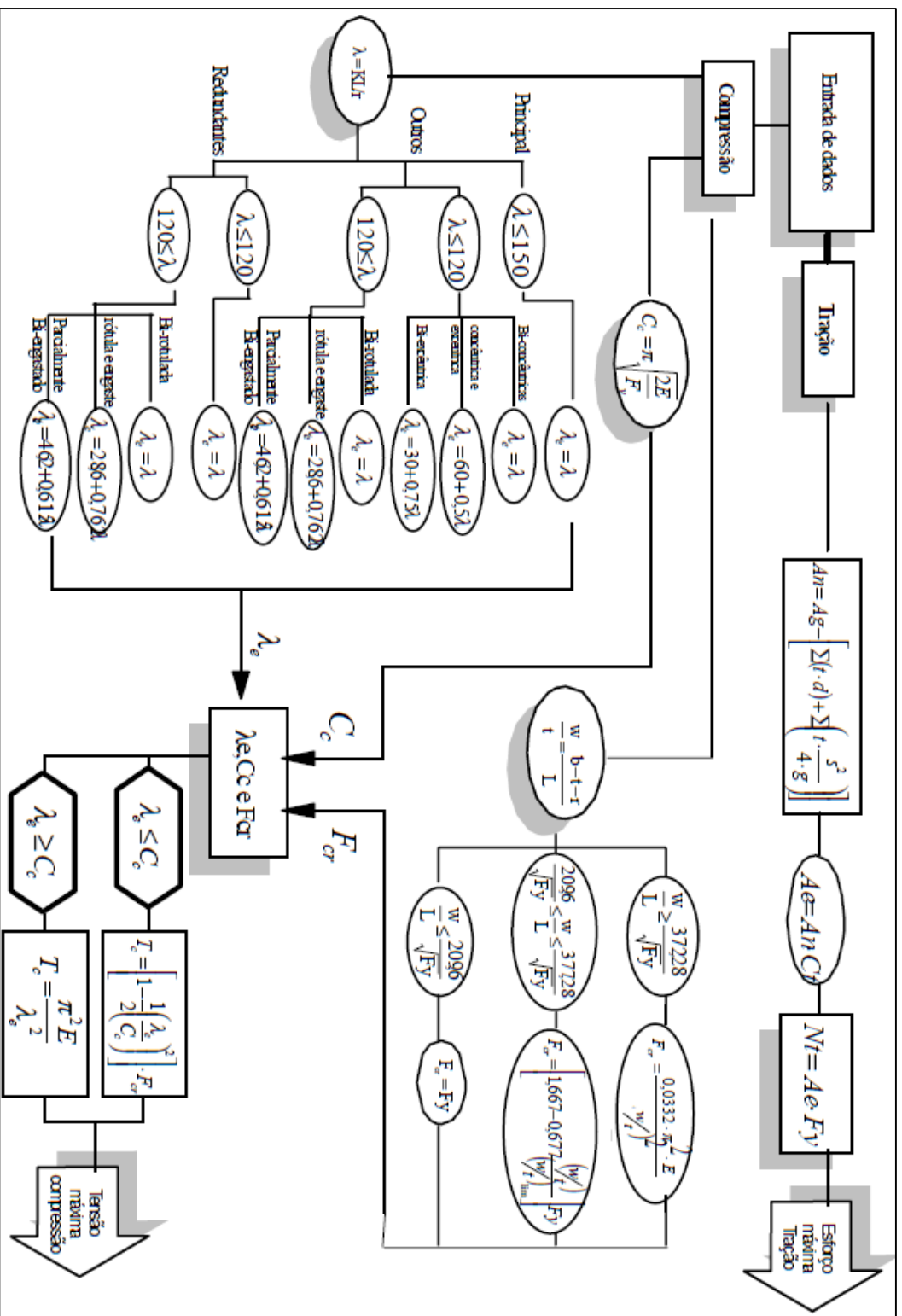
O suporte de linha de transmissão foi dividido em quatorze grupos, como pode-se observar na figura 34. Essa divisão visa reduzir racionalmente a variação de perfis metálicos da torre, organizando-os segundo a sua funcionalidade (suporte de cabos para-raios, mísulas, montantes e contraventamentos primários e secundários), evitando, desta forma, o superdimensionamento de elementos com baixas solicitações.

Figura 34 - Representação dos grupos.



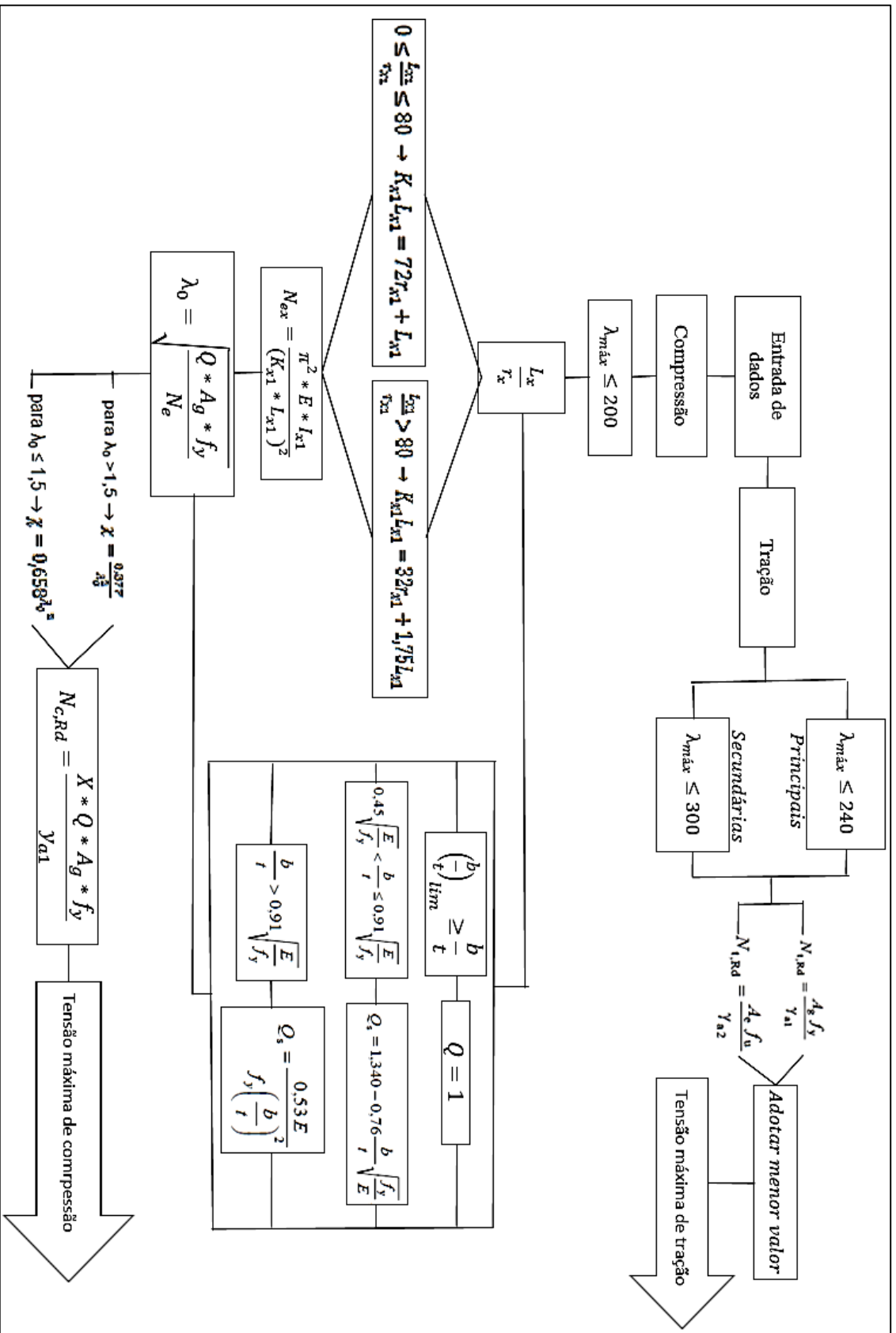
A metodologia de dimensionamento para a ASCE 10 (1997) e para a NBR (2008) foi executado de acordo com os fluxogramas expostos, respectivamente, nas figuras 35 e 36. Vale ressaltar que após o cálculo das mísulas superiores de cada torre, lançaram-se os perfis dimensionados para obter a solicitação de peso próprio atuantes nas barras subsequentes.

Figura 35 - Fluxograma para dimensionamento de peças de torres.



Fonte: Gabrielli (2004).

Figura 36 - Fluxograma de dimensionamento para NBR 8800 (2008).



4 RESULTADOS E ANÁLISES

Como foi mencionado anteriormente, existe algumas diferenças entre o dimensionamento pela ASCE 10 (1997) e a NBR 8800 (2008), fundamentalmente por não possuir, hoje, uma norma brasileira específica para o dimensionamento de suportes de linhas de transmissão. Neste capítulo serão analisadas estas diferenças, sendo também avaliados o custo benefício desta obra.

4.1 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DAS TORRES DE TRANSMISSÃO

Como visto no capítulo anterior, as torres utilizadas para o dimensionamento tanto pela norma Americana quanto pela Brasileira tiveram a mesma modelagem, sendo modeladas com barras bi engastadas, com presença de contraventamentos secundários e com base engastada. O que diferiu entre as torres foi apenas o carregamento devido à ação do vento, pois o mesmo varia em função da área exposta da estrutura. O presente trabalho não realizou o dimensionamento das ligações entre as barras, no entanto, para efeito de cálculo foi adicionado 5% de peso morto sobre cada grupo da estrutura para representar a carga-peso referente aos elementos de ligação entre barras (*gusset plates*, porcas e parafusos, etc.).

Para o dimensionamento dos grupos das torres foi utilizado o elemento mais solicitado à compressão e à tração, encontrados por meio das análises das hipóteses de carregamento realizado pelo *software* SAP2000. Após a obtenção das barras e suas respectivas tensões, iniciou-se o dimensionamento dos elementos solicitados, tendo-se em vista, replicar para todas as barras pertencentes ao grupo, o perfil que apresentar a maior resistência de cálculo para as tensões de compressão e de tração. O processo de dimensionamento levou em consideração a escolhas dos perfis metálicos que resistissem as solicitações impostas pela estrutura, ao mesmo tempo que agregava a menor carga peso global para o suporte.

4.1.1 Solicitações das barras às tensões de tração e compressão

As tabelas 9 e 10 que seguem logo abaixo, apresentam respectivamente as barras mais solicitadas a compressão e a tração para o dimensionamento que será realizado através da norma brasileira e da americana. Esses valores foram obtidos por meio da análise dos dois modelos

computacionais no *software* SAP2000. Observa-se uma pequena variação de esforço entre as barras dos dois modelos, esse fato ocorreu devido a mudanças de cargas e de perfis durante a modelagem para o pré-dimensionamento, ocasionando a redistribuição das cargas entre as barras pertencente a um mesmo nó.

Tabela 9 - Elementos mais solicitados a compressão.

Nº	Grupos	NBR 8800 (2008)		ASCE 10 (1997)	
		Compressão (kN)	L (cm)	Compressão (kN)	L (cm)
1	Mísula superior barras principais	66,31	82,23	66,31	82,23
2	Mísula superior contraventamento	15,00	55,00	15,00	55,00
3	Mísula inferior barras principais	105,00	200,00	105,00	200,00
4	Mísula inferior contraventamento	46,50	189,00	46,50	189,00
5	Montante superior barras principais	158,21	180,00	160,29	180,00
6	Montante superior contraventamento	79,64	142,13	84,68	142,13
7	Montante inferior barras principais	329,66	84,40	332,28	84,40
8	Montante inferior contraventamento em X	47,72	173,52	46,60	173,52
9	Montante inferior contraventamento em K	71,65	92,09	72,61	92,09
10	Montante inferior contraventamento em Y	85,74	121,96	86,56	121,96
11	Travamento horizontal superior	101,71	220,00	112,36	220,00
12	Travamento horizontal inferior	41,41	227,50	35,39	227,50
13	Contraventamento secundário	8,24	174,69	8,31	174,69
14	Barras de travamento interno	8,24	217,41	8,31	217,41

Tabela 10 - Elementos mais solicitados a tração.

Nº	Grupos	NBR 8800 (2008)		ASCE 10 (1997)	
		Tração (kN)	L (cm)	Tração (kN)	L (cm)
1	Mísula superior barras principais	45,20	225,00	45,20	225,00
2	Mísula superior contraventamento	2,45	115,30	2,45	115,30
3	Mísula inferior barras principais	61,95	108,60	61,95	108,60
4	Mísula inferior contraventamento	30,00	130,96	30,00	130,96
5	Montante superior barras principais	105,51	180,00	117,29	180,00
6	Montante superior contraventamento	82,20	142,13	86,83	142,13
7	Montante inferior barras principais	273,12	84,40	284,87	84,40
8	Montante inferior contraventamento em X	40,74	228,09	39,81	228,09
9	Montante inferior contraventamento em K	62,00	92,09	64,98	92,09
10	Montante inferior contraventamento em Y	80,59	121,96	81,16	121,96
11	Travamento horizontal superior	79,93	220,00	87,72	220,00
12	Travamento horizontal inferior	40,19	227,50	33,53	227,50
13	Contraventamento secundário	6,83	174,69	7,12	174,69
14	Barras de travamento interno	6,83	217,41	7,12	217,41

As barras descarregadas (contraventamento secundário) e as de travamento interno, possuem a função de reduzir o comprimento de flambagem dos elementos principais, não devendo apresentar solicitações de resistência na torre de transmissão, no entanto, para o

dimensionamento foi utilizado como resistência mínima 2,5% da máxima solicitação de cálculo atuante na barra principal contraventada da estrutura, seguindo as indicações da ASCE 10 (1997).

4.1.2 Dimensionamento das barras comprimidas

A tabela abaixo apresenta os resultados obtidos no dimensionamento dos elementos mais comprimidos de cada grupo, segundo a tabela 9. Por meio de análise dos dados, nota-se que, na maior parte dos grupos, os perfis resultantes do procedimento de cálculo da NBR 8800 (2008) ficaram expressivamente maiores, se comparados as seções obtidas pela norma Americana ASCE 10 (1997).

Tabela 11 - Perfis adotados para resistir as solicitações de compressão.

Grupos	NBR 8800 (2008)		ASCE 10 (1997)	
	Compressão (KN)	λ	Compressão (KN)	λ
1	2.1/2" 3/16"	66,32	2" 3/16"	80,62
2	1.1/4" 1/8"	72,37	1.1/4" 1/8"	72,37
3	4" 1/4"	100,00	3.1/2" 1/4"	113,64
4	3" 3/16"	126,00	3" 3/16"	126,00
5	4" 3/8"	90,00	4" 1/4"	90,00
6	3" 1/4"	94,75	3" 3/16"	94,75
7	5" 3/8"	33,62	4" 3/8"	42,20
8	3" 3/16"	115,68	2.1/2" 3/16"	139,93
9	3" 3/16"	61,39	2.1/2" 3/16"	74,27
10	3" 1/4"	81,31	2.1/2" 3/16"	98,35
11	4" 5/16"	110,00	3.1/2" 1/4"	125,00
12	3.1/2" 1/4"	129,26	3" 3/16"	151,67
13	2" 1/8"	171,27	2" 1/8"	171,27
14	2.1/2" 3/16"	175,33	2" 1/8"	213,14

A menor seção utilizada para resistir as solicitações de compressão foi o perfil L 1.1/4"1/8", que foi replicado para o contraventamento da mística superior, tanto para a torre dimensionada pela norma Brasileira quanto para a Americana. Os maiores perfis localizam-se nas montantes das torres, onde a tensão de compressão é dominante. As montantes da torre dimensionadas pela norma Brasileira possui seção de 5" 3/8", enquanto as montantes da torre Americana possui perfil de 4"3/8".

Vale ressaltar que no dimensionamento das barras de travamento interno da torre de transmissão, os perfis L 2.1/2"3/16" e 2"1/8", que são respectivamente os resultados obtidos

pela norma Brasileira e Americana, variaram entre si devido a diferença do limite de flambagem da NBR 8800 (2008). Pois a seção transversal 2”1/8” foi suficiente para resistir as solicitações imposta pela torre dimensionada pela norma Brasileira, no entanto, apresentava esbeltez acima do recomendado na literatura.

Ponderando os dados, pode-se inferir que a estrutura constituída com as barras obtidas pelo dimensionamento da NBR 8800 (2008) resultou numa torre mais robusta do que a constituída com os perfis obtidos pela ASCE 10 (1997), pois os perfis dimensionados pela norma Brasileira apresentaram maiores seções transversais e maiores áreas de massa, acarretando em uma estrutura global mais pesada.

4.1.3 Dimensionamento das barras tracionados

Os resultados do dimensionamento das barras tracionadas pela NBR 8800 (2008), apresentaram pouca diferença de barras quando comparadas com as obtidas pela ASCE 10 (1997), levando o dimensionamento de aproximadamente 71,43% dos grupos das torres a apresentarem as mesmas seções, como pode-se conferir na tabela 12. Os grupos 1 e 11, que corresponde, respectivamente, as barras principais da mísula superior e os elementos de travamento horizontal superior, tiveram perfis distintos entre as normas devido ao limite de flambagem da NBR 8800 (2008) ser menor do que o permitido pela ASCE 10 (1997).

Tabela 12 - Perfis adotados para resistir as solicitações à tração.

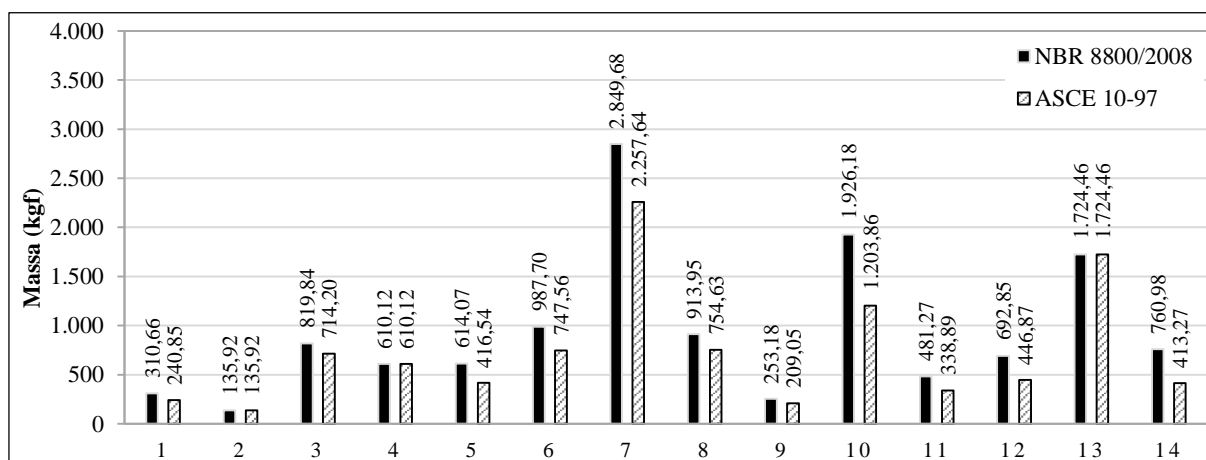
Grupos	NBR 8800		ASCE 10-97	
	Tração (KN)	λ	Tração (KN)	λ
1	2” 1/8”	220,59	1.3/4” 1/8”	252,81
2	1.1/4” 1/8”	180,16	1.1/4” 1/8”	180,16
3	2” 1/8”	106,47	2” 1/8”	106,47
4	1.1/4” 1/8”	204,63	1.1/4” 1/8”	204,63
5	2.1/2” 3/16”	145,16	2.1/2” 3/16”	145,16
6	2” 3/16”	139,34	2” 3/16”	139,34
7	4” 1/4”	42,20	4” 5/16”	42,20
8	2” 1/8”	223,61	2” 1/8”	223,61
9	2” 1/8”	90,29	2” 3/16”	90,29
10	2” 3/16”	119,57	2” 3/16”	119,57
11	2.1/2” 3/16”	215,69	1.3/4” 1/8”	247,19
12	2” 1/8”	223,04	2” 1/8”	223,04
13	1.1/2” 1/8”	229,86	1.1/2” 1/8”	229,86
14	1.3/4” 1/8”	244,28	1.3/4” 1/8”	244,28

Os perfis encontrados no dimensionamento das barras solicitadas aos esforços de tração foram menores do que os perfis dimensionados para as barras comprimidas. Dessa maneira, no modelo computacional, os perfis resultantes do dimensionamento das barras solicitadas à compressão prevaleceram uniformemente com intuito de sanar a necessidade de perfis mais resistentes para atender as máximas tensões.

4.1.4 Peso do suporte de linha de transmissão

Os perfis dimensionados foram inseridos na modelagem computacional dos suportes treliçados metálicos, para obtenção do peso total da torre e dos pesos característicos de cada grupo da estrutura. Esses valores são calculados automaticamente pelo *software* SAP2000. O gráfico 1 apresenta a comparação entre o peso total de cada grupo da torre dimensionada pela ASCE 10 (1997) e pela NBR 8800 (2008).

Gráfico 1 - Comparação do peso total dos grupos da torre metálica.

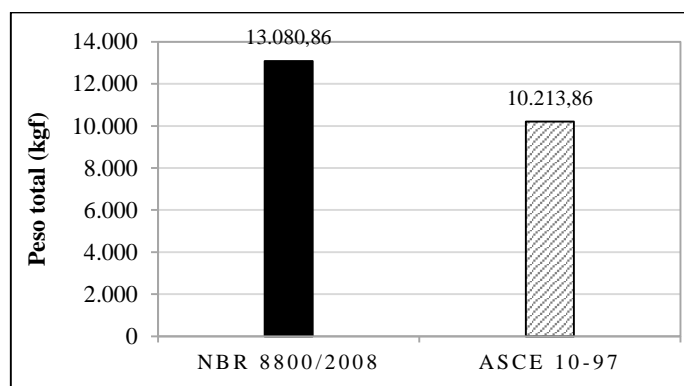


Nota-se que a diferença de peso total em alguns grupos é considerável, isso deve-se ao fato dos perfis adotados pelo processo de cálculo da NBR 8800 (2008) possuem maior área, gerando desta forma grupos mais pesados. Os elementos coligados que apresentaram maiores diferenças foram: as barras de travamento interno (Grupo 14) com diferença de 45,69%, o contraventamento em Y das montantes inferiores (Grupo 10) com diferença de 37,5%, os travamentos horizontais inferiores (Grupo 12) com diferença de 35,50%, as barras principais das montantes superiores (Grupo 5) com diferença de 32,17% e os travamentos horizontais superiores (Grupo 11) com diferença de peso de 29,58%. Os pesos dos grupos da norma

Brasileira são mais elevados do que os apresentados pela norma Americana, como pôde-se observar no gráfico 1. Esses valores foram obtidos com a diferença dos pesos da NBR 8800 (2008) com os da ASCE 10 (1997).

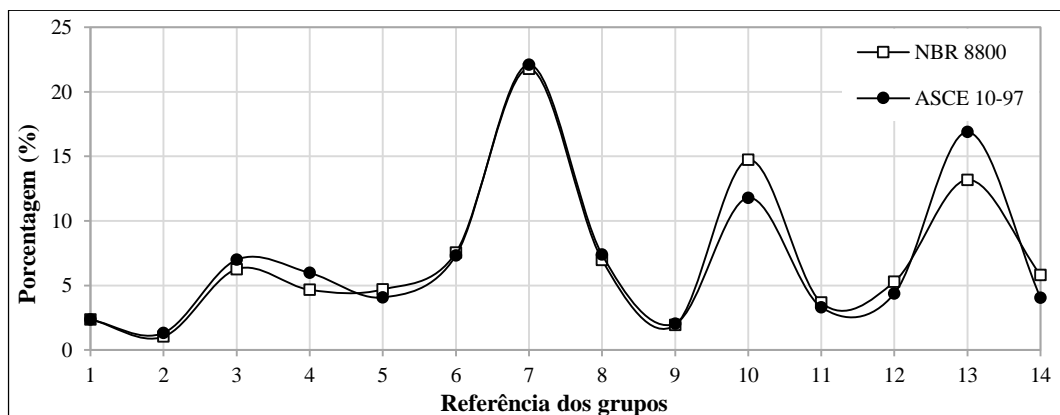
Por este motivo, o suporte de linha de transmissão dimensionada pela NBR 8800 (2008) resultou em maior peso global da estrutura, conforme os dados disponíveis no gráfico 2. Usando ASCE 10 (1997) como referência, pode-se notar que a torre Brasileira apresenta 28% de massa total superior ao peso global da estrutura metálica dimensionada pela norma americana.

Gráfico 2 - Peso total das estruturas modeladas.



O gráfico abaixo mostra a distribuição do peso total da estrutura pelos grupos das torres. Em ambos os suportes metálicos de linha de transmissão, o maior peso morto está nas montantes inferiores, sendo 21,70% da torre modelada com os perfis obtidos pelo dimensionamento da NBR 8800 e 22,10% da torre que obedece as considerações de cálculo da ASCE 10, devido ao grande comprimento dos perfis, aliado ao fato de serem os elementos com as maiores seções transversais.

Gráfico 3 – Porcentagem do peso dos grupos pelo peso total da torre.



Observa-se que o suporte treliçado para linha de transmissão dimensionado pela norma Americana apresenta menor peso global, por este motivo, os elementos do contraventamento secundário (grupo 13), no gráfico 3, correspondem a uma maior porcentagem do peso total da torre, mesmo estes sendo mais leve que as barras do contraventamento secundário da torre Brasileira.

4.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES

Realizou-se a análise modal nos dois modelos computacionais com intuito de verificar a diferença da susceptibilidade das estruturas metálicas às ações dinâmicas do vento, obtendo-se as frequências e modos naturais de vibração das torres. Na tabela a seguir, apresenta-se as dez primeiras frequências naturais das torres treliçadas, modeladas com os perfis obtidos pelo dimensionamento da NBR 8800 (2008) e ASCE 10 (1997).

Tabela 13 - Frequência natural das torres (Hz).

Modo	NBR 8800	ASCE 10-97
1	3,2423	2,9600
2	3,2836	2,9931
3	6,8438	6,0651
4	6,9114	6,1162
5	9,8826	8,3998
6	11,201	10,144
7	11,696	10,665
8	13,074	11,236
9	13,344	12,317
10	13,717	12,787

De acordo com a NBR 8850 (2003) uma análise dinâmica torna-se necessária para torres não usuais, muito esbeltas, cuja frequência natural seja menor que 2 Hz. E acrescenta, não recomendando torres que resultem em frequência inferior a 1 Hz. Deste modo, ambas as torres não necessitam de uma análise dinâmica da estrutura, sendo suficiente apenas uma análise estática do suporte de linha de transmissão.

Para garantir a não obrigatoriedade de considerar os efeitos dinâmicos do vento na estrutura, foi realizado o cálculo dos períodos fundamentais da estrutura, por meio da equação 64. A torre dimensionada pela norma Brasileira e Americana apresentaram período igual a 0,3084 s e 0,3378 s, respectivamente. Para essa verificação foi utilizado as recomendações da

NBR 6123 (1988), a qual assegura que estruturas com período de frequência igual ou inferior a 1 segundo, não necessita de cálculo que levem em consideração as ações dinâmicas do vento (Gráfico 4).

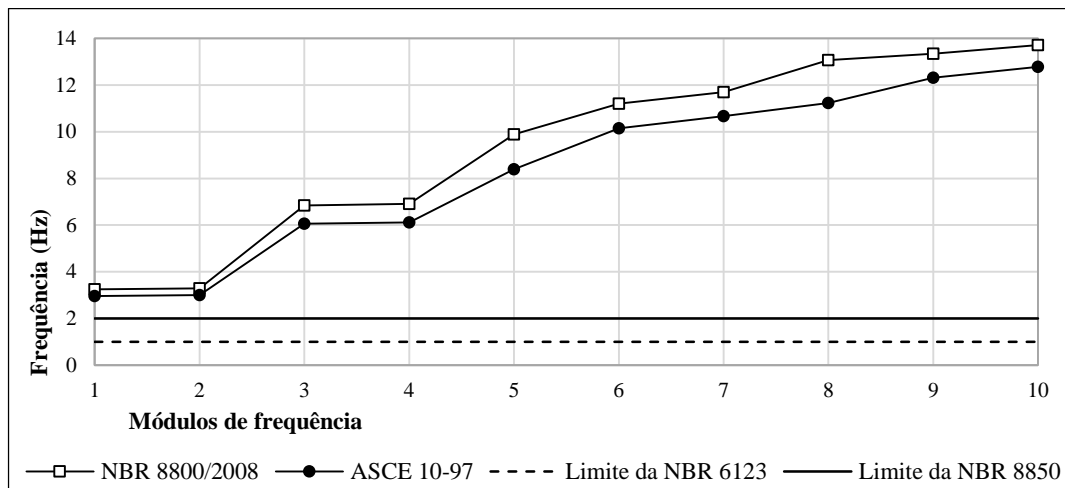
$$T = \frac{1}{f} \quad [s] \quad (64)$$

Onde:

T é o período em s;

f é a frequência em Hz.

Gráfico 4 - Frequência natural das torres.



A análise modal considerou o suporte metálico como uma estrutura isolada. De acordo com Gabrielli (2004), esse tipo de consideração não representa fielmente a realidade, pois na prática, os suportes de linhas de transmissão não trabalham individualmente, sendo susceptível a influência dos cabos condutores e dos cabos para-raios, que por sua vez são elementos propensos a sofrerem ações dinâmicas do vento devido sua flexibilidade.

4.3 COMPARAÇÃO SIMPLIFICADA DE RESULTADOS DOS CALCULO DA NBR 8800 (2008) E ASCE 10 (1997)

Para melhor exemplificar algumas diferenças entre as duas normas, realizou-se o dimensionamento à compressão e à tração de um elemento padrão descarregado da torre de

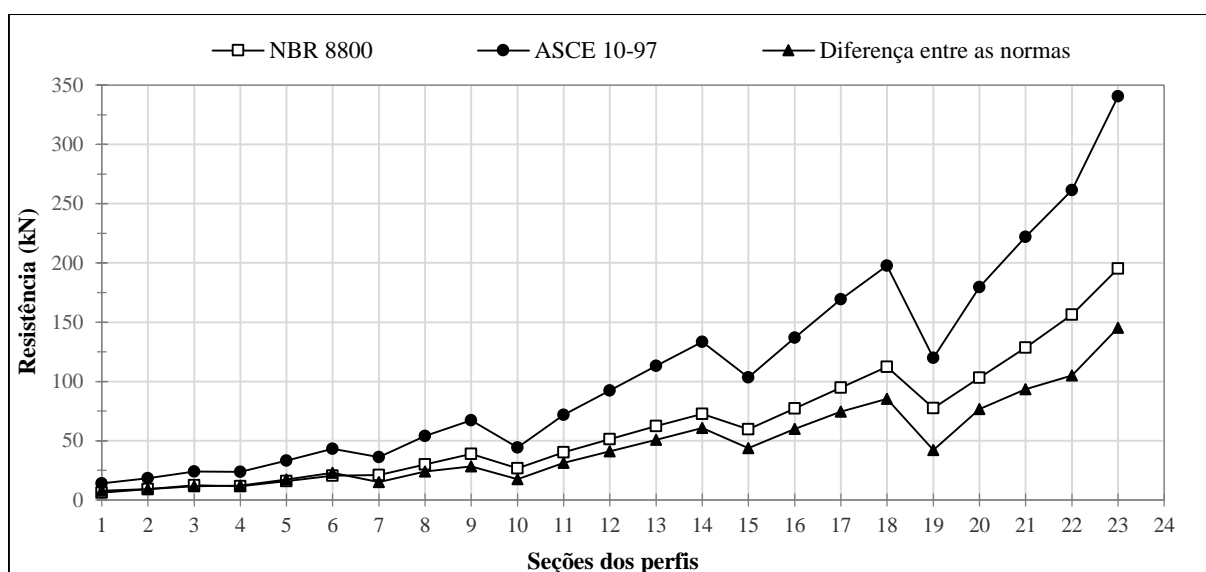
transmissão que, apresenta relação comprimento-espessura suficiente para evitar flambagem local (seções compactas). Vale salientar que as formulações para cálculo estão simplificadas, haja visto que existem inúmeras exigências e verificações que precisam ser realizadas para obter a capacidade de resistência das peças metálicas.

Os perfis foram elencados de acordo com os requisitos dimensionais estabelecidos pelo INMETRO (2006) seguindo a ordem de aumento gradativamente do comprimento da aba e posterior aumento da espessura, conforme dados encontrados no ANEXO 1 (Perfis do catalogo da GERDAU®). O elemento padrão descarregado do suporte metálico de transmissão tem comprimento total de 100 cm.

4.3.1 Dimensionamento das peças solicitadas a compressão

O gráfico abaixo mostra a resistência das primeiras vinte e três variações de seções de perfis, de acordo com as duas normas. Nota-se que a linha traçada pelos resultados apresentados pela norma Americana sobressai-se substancialmente à medida que os perfis aumentam de espessura e a largura, quando comparados aos resultados encontrados pela NBR 8800 (2008). A média máxima de resistência à compressão entre as normas foi igual a 59,55% e a mínima foi igual a 50,73%, apresentando um desvio padrão de 4,65%. Esses valores correspondem a parcela de resistência da norma Brasileira com relação a norma Americana.

Gráfico 5 - Resistência à compressão.

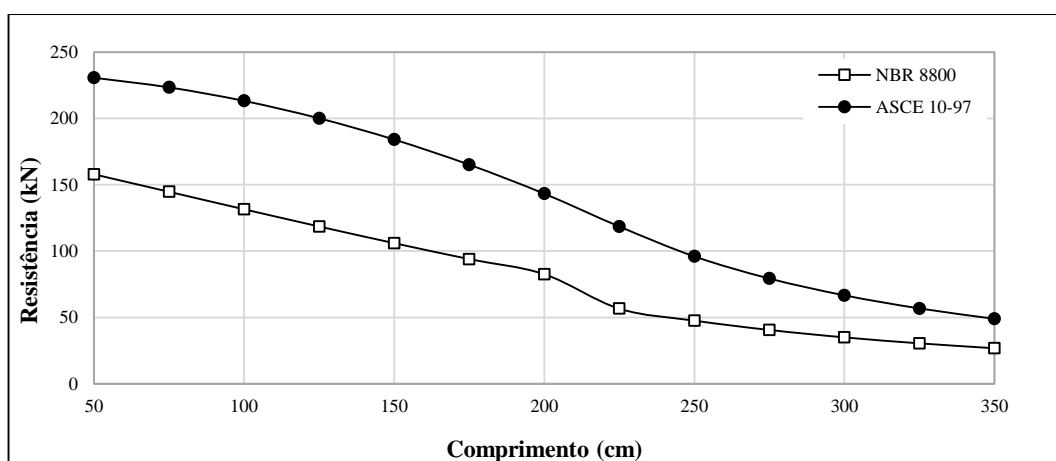


O gráfico 5 mostra que, para uma mesma carga solicitante, o perfil dimensionado segundo a NBR 8800 (2008) apresenta menor resistência de cálculo. Esse fato tem como consequência a geração de projetos com perfis de maior área, devido a necessidade de aumentar a relação comprimento-espessura das abas das barras da estrutura dimensionada. Por outro lado, o aumento do peso dos perfis podem contribuir positivamente na estabilidade da estrutura, tornando a torre mais resistente às solicitações impostas pela linha de transmissão ao longo de sua vida útil.

A norma americana ASCE 10 (1997) confere aos perfis dimensionados maiores liberdades de resistência de cálculo, possibilitando a criação de estruturas mais esbeltas e consequentemente mais leves. No entanto, suportes metálicos esbeltos apresentam maiores possibilidades de falhas antes de atingirem as cargas últimas de ruptura, pelo fato de estarem mais propícios a flambagem e a ações dinâmicas do vento.

Realizou-se cálculos com o perfil L com seção 3.1/2"1/4" para verificar a mudança de resistência nominal de uma seção à medida que sua esbelteza aumenta. Para tanto, o dimensionamento foi efetuado até o comprimento máximo que o limite de esbelteza para compressão permite (Gráfico 6). Pelo gráfico pode-se observar que a diferença entre as normas revelar-se constante à medida que aumenta o comprimento do elemento. A norma Brasileira corresponde à uma média máxima de 62,54% da norma Americana, apresentando um desvio padrão de 5,74%.

Gráfico 6 - Relação entre a resistência da seção 3.1/2"1/4" e o comprimento.



Os dados apresentados acima mostram que existem grandes diferenças entre os resultados das normas regulamentadoras. A comparação da resistência dos perfis, à medida que

aumenta o comprimento, mostrou-se menos discrepante quando comparado à verificação da resistência com o aumento de seção bruta dos perfis. No entanto, a diferença dos valores dos resultados entre as normas ainda é considerável. As informações obtidas nos gráficos, justificam o maior peso final do suporte metálico de linha de transmissão da NBR 8800 (2008).

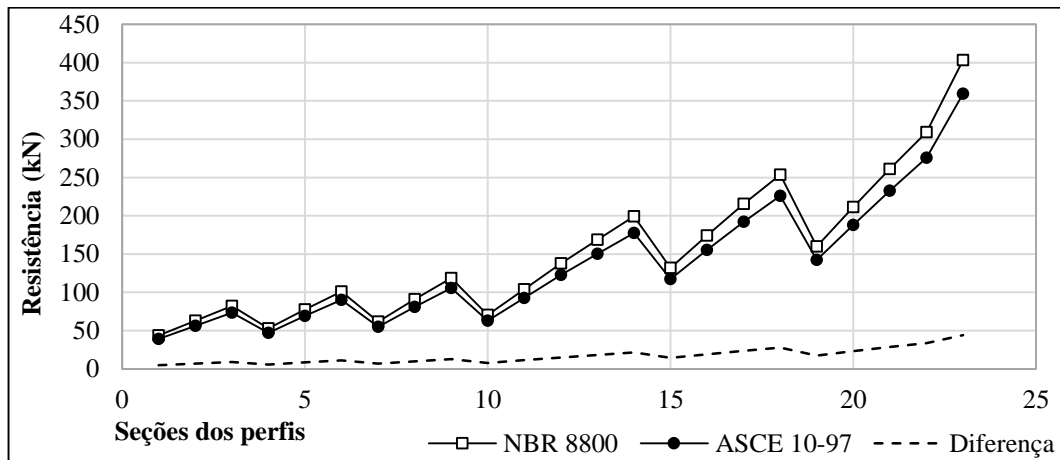
O processo de cálculo à compressão é divergente entre as normas, isso pode ser explicado pelo fato das normas apresentarem finalidades diferentes, apesar de algumas ligeiras semelhanças. A NBR 8800 (2008) utilizou a norma americana ANSI/AISC 360-05 (*Specification for Structural Steel Buildings*) como uma das normas fundamentadora de suas prescrições. Em suas especificações, tais normas apresentam a função de nortear os dimensionamentos de estruturas de aço em edifícios, acarretando desta forma, a criação de maiores coeficientes de ponderação para as solicitações (majoração) e para a resistência das peças das estruturas (minoração), visando a segurança dos usuários. Outro ponto que vale destacar, são as restrições específicas de flambagem presente nessas normas que visam garantir o conforto dos usufruidores da estrutura.

Por outro lado, o Brasil não apresenta norma específica para torres de transmissão igual a norma Americana, desde 2013, data em que a NBR 8850 (1985) foi cancelada pela ABNT por falta de uso no setor elétrico. O projeto NBR 8850 (2003) tinha como base a norma Americana ASCE 10 (1997) e o Manual N° 52, normas que são bastante utilizadas nesse segmento de estrutura, devido sua especificidade. As informações contidas nessa norma era própria para torres de transmissão, o que resultava em um dimensionamento racional, pelo fato de mostrar considerações de cálculo de resistência e de flambagem contemplava as peculiaridades e a funcionalidade dos suportes metálicos de linha de transmissão.

4.3.2 Dimensionamento das peças solicitadas à tração

Diferentemente do procedimento de cálculo para dimensionamento à compressão, que gerou valores de resistência consideravelmente divergentes entre as normas, os resultados obtidos com o cálculo de tração pouco variaram entre as normas, como é possível observar no gráfico 7. Os dados apresentaram desvio padrão próximo de zero, a NBR 8800 (2008) mostrou uma média 12,23% de resistência superior as seções dimensionadas pela norma americana.

Gráfico 7 – Resistência à tração.



Vale ressaltar que não foi realizado o dimensionamento das ligações entre perfis e adotou-se as seções com menor resistência na área bruta do perfil. Contudo, os critérios de dimensionamento de barras tracionadas da ASCE 10 (1997) – segundo o qual o estado limite considerado é de escoamento na área líquida da seção transversal da cantoneira - é diferente dos critérios da NBR 8800 (2008), na qual os estados limites considerados são os de escoamento na área bruta e de ruptura na área líquida.

Apesar da maior resistência dos perfis dimensionados pela norma Brasileira, frisa-se que a ASCE 10 (1997) diferencia-se e ganha vantagens no que diz respeito ao limite de flambagem, apresentando valores consideravelmente superiores ao limitados pela NBR 8800 (2008). A norma brasileira especifica um limite padrão de esbeltez em peças tracionadas, enquanto que a norma americana taxa valores de limite de esbeltez que variam de acordo com a função estrutural do elemento da torre.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu num estudo comparativo entre a aplicação das normas ASCE 10 (1997) e da NBR 8800 (2008) ao dimensionamento de uma estrutura metálica treliçada de transporte de energia elétrica. Para este motivo, foi calculado a ação do vento sobre os nós da estrutura, de acordo com a NBR 5422 (1985). Posteriormente, foi realizada a análise de uma torre do tipo autoportante de suspensão de 50,7 metros de altura utilizando o programa SAP2000. Tendo se executado depois disso o dimensionamento pelo programa Microsoft Office Excel utilizando os procedimentos já demonstrados. Finalmente efetuou-se o estudo comparativo entre as normas.

A comparação entre as normas mostrou que o suporte metálico de linha de transmissão dimensionados pela norma Brasileira ficou mais robusta e pesada que a torre metálica dimensionada pela norma Americana. Esse fato tornou a torre que segue a NBR 8800 (2008) mais onerosas, se comparado a ASCE 10 (1997). No entanto, os aumentos do peso dos perfis contribuem positivamente na estabilidade da estrutura, tornando-as mais resistente às solicitações impostas ao longo da vida útil da linha de transmissão.

A norma americana ASCE 10 (1997), confere aos perfis dimensionados à compressão resistência de cálculo superiores ao obtidos pela NBR 8800 (2008), ocasionando desta forma, um projeto final de torre de transmissão de energia com silhueta mais esbeltas e, conseqüentemente, mais leves. No entanto, suportes metálicos esbeltos são mais propensos a falhar antes da carga última de resistência, por serem mais suscetíveis a falhas por flambagem e ações dinâmicas do vento, causando na estrutura deformação plástica excessiva ou instabilidade.

As torres dimensionadas pela norma Brasileira e Americana, apresentaram frequência natural acima de 2 Hz, valor este superior ao recomendado pela NBR 6123 (1988), ASCE/SEI 7 (2010) e pela antiga norma norteadora para torres de transmissão no Brasil NBR 8850 (2003). A análise modal foi realizada com intuito de verificar a susceptibilidade das estruturas metálicas às ações dinâmicas do vento. Análise dinâmica tornou-se desnecessária pelo fato das vibrações livres estarem acima do recomendado.

A NBR 8800 (2008) tem função de nortear os dimensionamentos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios no Brasil, por se tratar de uma norma geral, suas restrições podem gerar grandes margens de segurança para estrutura que não apresentam funções habitacionais ou laborais, por não contemplar com precisão particularidades desse tipo de estrutura. Deste modo, faz-se necessário estudos mais aprofundados em estruturas de torres de transmissão no Brasil, para que seja proposto métodos de cálculos pormenorizados, adequados para a servicibilidade desse tipo de estrutura.

Vale ressaltar que, atualmente, o Brasil não apresenta norma específica para suporte de linha de transmissão, situação resultante das modificações realizadas na ABNT no ano de 2013, com a exclusão da NBR 8850 (1985), com a alegação de falta de uso no setor elétrico. Por este motivo, os dimensionamentos de torres metálicas de linha de transmissão realizados com recomendações Brasileiras devem seguir as prescrições da NBR 8800 (2008).

As pesquisas realizadas para elaboração da presente literatura, mostraram deficiência na quantidade de trabalhos aprofundados referentes ao tema de torres metálicas de transmissão, por este motivo, vale ressaltar a necessidade de estudos contínuos para discretização das características comportamentais desse tipo de estrutura espaciais treliçadas construídas no Brasil, hodiernamente, são poucos os trabalhos desenvolvidos neste campo da engenharia estrutural no país.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, executou-se a comparação do dimensionamento juntamente com uma breve análise de custo benefício entre a norma Brasileira NBR 8800 (2008) e a norma Americana ASCE 10 (1997) de um tipo específico de estrutura treliçada, autoportante, com função estrutural de suporte de suspensão da linha de transmissão. Para trabalhos posteriores recomendamos os seguintes estudos:

- Executar o mesmo estudo, porém com suporte de linha de transmissão com estrutura estaiada;
- Verificar o comportamento das estruturas dimensionadas pelas norma Brasileira e norma Americana de acordo com a variação de altura do suporte de linha de transmissão;

- Analisar e comparar os efeitos de segunda ordem no comportamento das estruturas pela ASCE 10 (1997) e NBR 8880 (1985);
- Análise comparativa das normas NBR 5422 (1985) e IEC 60826 (2003);
- Análise comparativa de torres para diferentes funcionalidades (estrutura de ancoragem, ângulo, derivação e transposição).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ASCE 10-97**: Design of latticed steel transmission structures. Reston, Virginia, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Redes de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5422**: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto NBR 8850**: Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BRITTES, J. L. P.; RIBEIRO, J. E. **Desempenho de linhas de transmissão que utilizam para-raios de ZnO**. ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citene12001/trabalhos%5C04.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2015.

CLIMATE. **Clima**: Tucuruí. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/880055/>>. Acesso em: 04 nov. 2015.

DIAS, J. R. **Análise e Dimensionamento de Estruturas Metálicas Treliçadas de Transporte de Energia Elétrica de Acordo com o EC3(EN) e a EN50341-1**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

ELETROBRAS. **Como a energia elétrica é transmitida no Brasil**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/natrilhadaenergia/energiaeletrica/services/eletrobras/trilhaenergia/pdfs/como-a-energia-eletrica-e-transmitida-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

ELETROBRAS. **Entenda a indústria de energia elétrica: TRANSMISSÃO**. Disponível em: <<http://www.eletrobrasroraimea.com/wp-content/uploads/2011/01/M%C3%93DULO-1-A-IND%C3%93STRIA-DE-ENERGIA-EL%C3%89TRICA.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2015.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 6. ed., 2006.

FREITAS, J. A. T.; TIAGO, C. **Análise Elástica de Estruturas Reticuladas**. São Paulo: Técnico Lisboa, 2015.

GABRIELLI, T. V. **Análise do Comportamento Estrutural de Torres de Transmissão Tubulares Via Simulação Computacional**. Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

GONTIJO, C.R. **Cálculo de Torres para Linhas de Transmissão**. Belo Horizonte: IEA Editora, Edição Única, 1994.

JÚNIOR, J. K.; ALVA, G. M. S.; MIGUEL, A. L. F. F.; MIGUEL, L. F. F. **Comportamento de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão considerando a flexibilidade das ligações e a interação solo-estrutura**. XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 2009.

JÚNIOR, J. K.; MIGUEL, L. F. F.; MENEZES, R. C. R.; MIGUEL, L. F. F.; ALVA, G. M. S. **Análise do comportamento de torres de um segmento de LT submetido à carga dinâmica de ruptura de cabo**. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Córdoba, Argentina, 2007.

KAHLA, N. B. **Dynamic Analysis of Guyed Towers**. Engineering Structures, 1994.

LABEGALINI, P. R. *et. al.* **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. Editora Edgard Blucher LTDA, 1992.

PANNONI, F. D. **Aços Estruturais**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com.br/arquivos-tecnicos/12.brasil.es-ES.force.axd>>. Acessado em: 02 nov. de 2015.

PRICKETT, S. L.; KEMPNER, L. JR.; MUELLER, W. H. **Limit States Analysis of Lattice Steel Transmission Towers, In**. Proceedings of the American Power Conference, 1986.

RODRIGUES, R. S. **Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1999.

SIEMENS. **Para-raios para linhas de transmissão**: Para uma elevada confiabilidade do sistema. Disponível em: <<http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/downloads/h51-flyer-line-arrester-portuguese.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2015.

SINGH, K. S. **Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão**. Brasília: Universidade de Brasília, 2009.

VELOZO, L. T.; ROEHL, D. M.; ALMEIDA, A. A. D. **Metodização do Estudo das Fundações para Suporte de Linhas de Transmissão**. Rio de Janeiro, 2010. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

GERDAU. **Catálogo de barras e perfis**. Disponível em: <https://www.gerdau.com.br%2Fprodutos-catalogo-e-manuais%2F5504.global.pt-BR.force.axd&usg=AFQjCNFy8srEx6YNWr_Rx6CnxpN-6mZl9Q&sig2=z3yemosJ0PO1bU8jkhpdwtw&bvm=bv.108194040,d.Y2I>. Acesso em: 13 out. 2015.

ANEXO A - CANTONEIRAS DE ABAS IGUAIS GERDAU®

Perfis cantoneira de abas iguais aço ASTM A36, com Limite de Escoamento (L_y) igual a 2530 kgf/cm², Limite de Ruptura (L_u) igual a 4077 kgf/cm² e Módulo de Elasticidade do aço (E) igual a 200 GPa.

Tabela A1 – Catálogo da GERDAU.

Referência.	Perfil	br (mm)	tr (mm)	Área (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	r _{min} (cm)	x (cm)
	1/2" 1/8"	12,70	3,17	0,70	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
	5/8" 1/8"	15,88	3,17	0,90	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
	3/4" 1/8"	19,05	3,17	1,11	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
	7/8" 1/8"	22,20	3,17	1,32	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
	1" 1/8"	25,40	3,17	1,48	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
	1" 3/16"	25,40	4,76	2,19	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
	1" 1/4"	25,40	6,35	2,84	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1	1.1/4" 1/8"	31,75	3,17	1,93	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
2	1.1/4" 3/16"	31,75	4,76	2,77	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
3	1.1/4" 1/4"	31,75	6,35	3,62	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
4	1.1/2" 1/8"	38,10	3,17	2,32	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
5	1.1/2" 3/16"	38,10	4,76	3,42	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
6	1.1/2" 1/4"	38,10	6,35	4,45	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
7	1.3/4" 1/8"	44,45	3,17	2,71	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
8	1.3/4" 3/16"	44,45	4,76	4,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
9	1.3/4" 1/4"	44,45	6,35	5,22	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
10	2" 1/8"	50,80	3,17	3,10	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
11	2" 3/16"	50,80	4,76	4,58	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
12	2" 1/4"	50,80	6,35	6,06	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
13	2"5/16"	50,80	7,94	7,42	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
14	2" 3/8"	50,80	9,52	8,76	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
15	2.1/2" 3/16"	63,50	4,76	5,80	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
16	2.1/2" 1/4"	63,50	6,35	7,67	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
17	2.1/2" 5/16"	63,50	7,94	9,48	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
18	2.1/2" 3/8"	63,50	9,52	11,16	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
19	3" 3/16"	76,20	4,76	7,03	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
20	3" 1/4"	76,20	6,35	9,29	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
21	3"5/16"	76,20	7,94	11,48	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
22	3" 3/8"	76,20	9,52	13,61	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
23	3" 1/2"	76,20	12,70	17,74	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36
	3.1/2" 1/4"	88,90	6,35	10,90	83,70	13,00	2,77	1,76	2,46
	3.1/2" 5/16"	88,90	7,94	13,50	102,00	16,00	2,75	1,75	2,52
	3.1/2" 3/8"	88,90	9,52	16,00	121,00	19,20	2,75	1,75	2,58
	4" 1/4"	101,60	6,35	12,51	125,00	16,40	3,17	2,00	2,77
	4" 5/16"	101,60	7,94	15,48	154,00	21,30	3,15	2,00	2,84
	4"3/8"	101,60	9,52	18,45	183,00	24,60	3,12	2,00	2,90
	4" 7/16"	101,60	11,11	21,35	208,00	29,50	3,12	1,98	2,95
	4" 1/2"	101,60	12,70	24,19	233,00	32,80	3,10	1,98	3,00

Referência.	Perfil	b _f (mm)	t _f (mm)	Área (cm ²)	I _x (cm ⁴)	W _x (cm ³)	r _x (cm)	r _{min} (cm)	x (cm)
	5" 5/16"	127,00	7,94	19,50	308,00	33,40	3,97	2,53	3,47
	5" 3/8"	127,00	9,52	23,29	362,00	39,50	3,94	2,51	3,53
	5" 1/2"	127,00	12,70	30,64	470,00	52,50	3,91	2,49	3,63
	5" 5/8"	127,00	15,88	37,80	566,00	64,00	3,86	2,46	3,76
	5" 7/16"	127,00	11,11	26,96	416,68	45,71	3,93	2,50	3,58
	6" 3/8"	152,40	9,52	28,10	641,00	57,40	4,78	3,02	4,17
	6" 1/2"	152,40	12,70	37,09	828,00	75,40	4,72	3,00	4,27
	6" 5/8"	152,40	15,88	45,86	1007,00	93,50	4,67	2,97	4,39
	6" 3/4"	152,40	19,05	54,44	1173,00	109,90	4,65	2,97	4,52
	8" 5/8"	203,20	15,88	62,90	2472,40	168,90	6,31	4,01	5,66
	8" 3/4"	203,20	19,05	73,81	2901,10	199,90	6,27	3,99	5,79

.Referência – Numeração válida para a comparação realizada no capítulo 4.3.

Fonte: Gerdau (2015).

ANEXO B – PLANTAS DO SUPORTE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Figura B1 – Vista frontal.

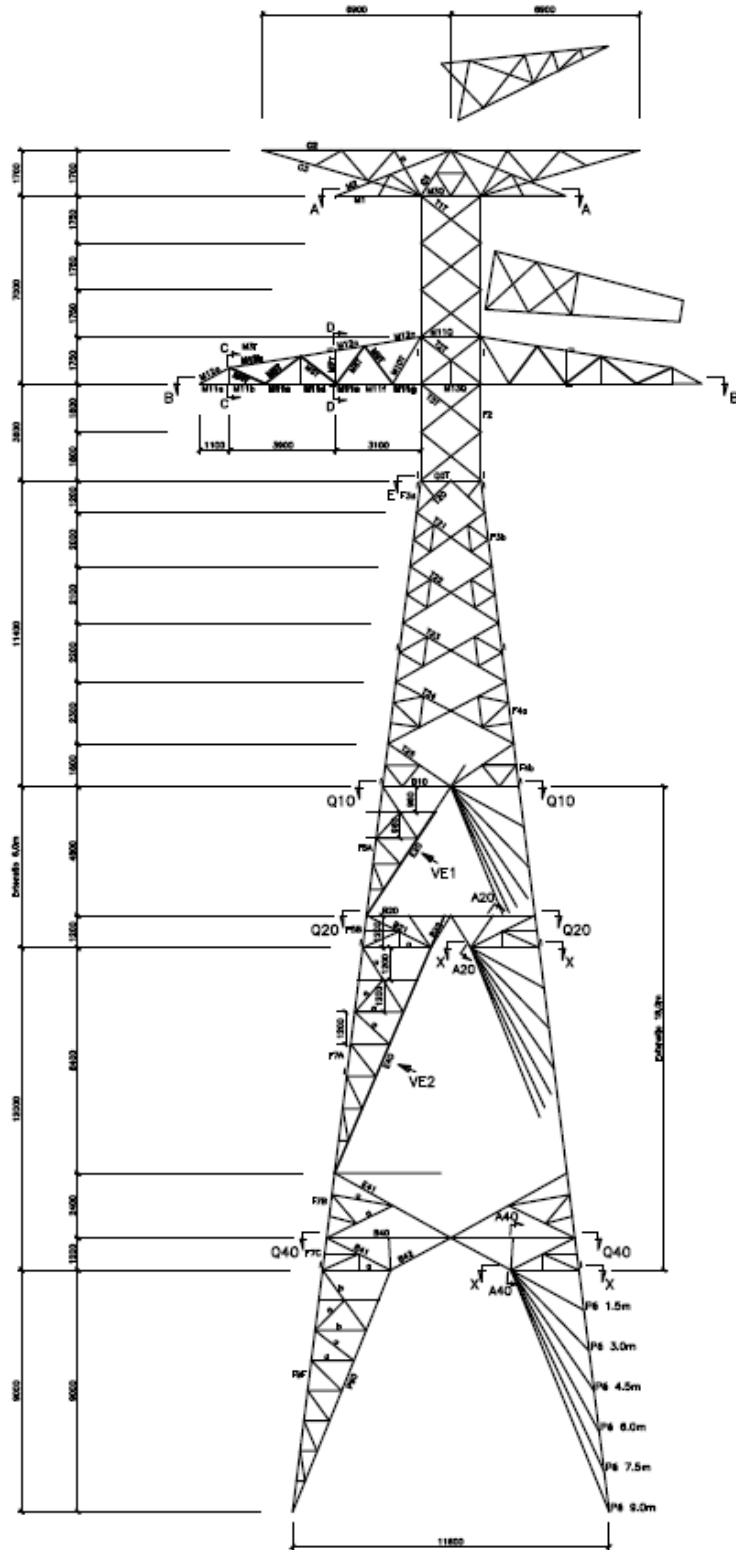


Figura B2 – Vista lateral.

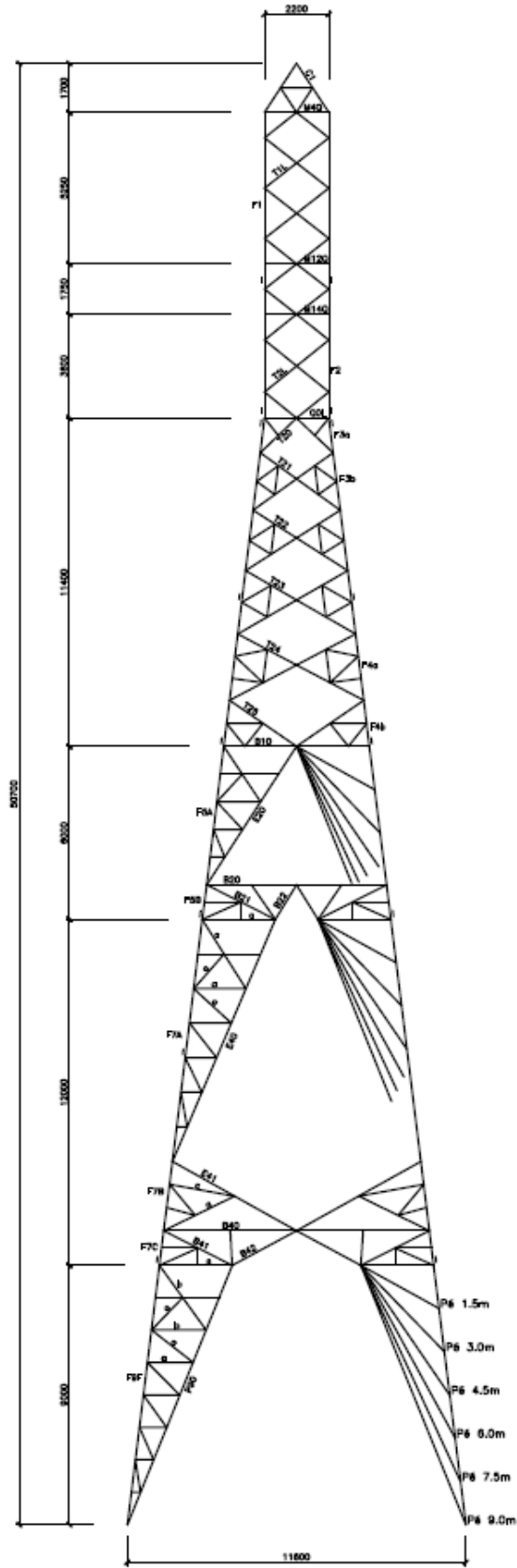
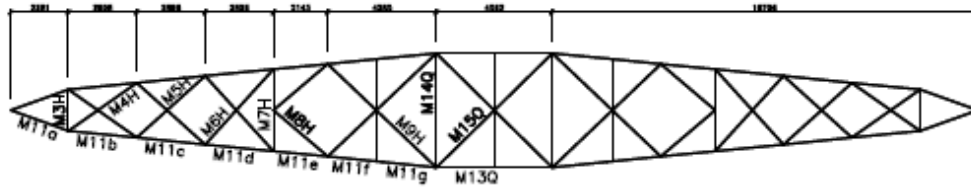
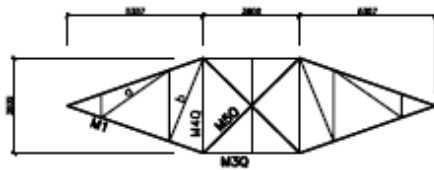


Figura B3 – Vista lateral.



Corte B-B



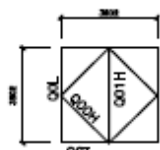
Corte A-A



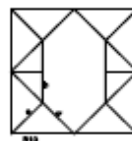
Corte C-C



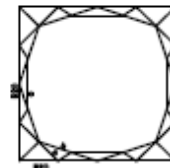
Corte D-D



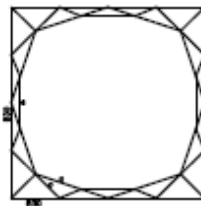
Corte E-E



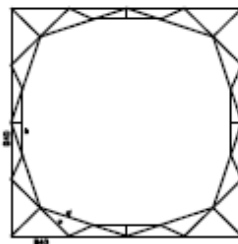
Corte Q10-Q10



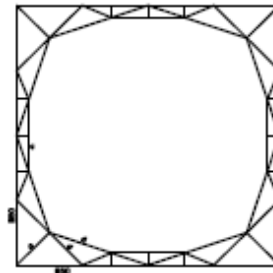
Corte Q20-Q20



Corte Q30-Q30



Corte Q40-Q40



Corte Q50-Q50

