

Tema: Infraestrutura (projeto e elementos construtivos)

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO DE TORRES PARA LINHAS DE  
TRANSMISSÃO DE ACORDO COM AS NORMAS NBR8800:2008 E ASCE 10-15**

Angelo Braz Fadini Fabri<sup>1</sup>

**Resumo**

Estruturas para linhas de transmissão de energia elétrica são elementos essenciais no desenvolvimento de um país. No Brasil, essas estruturas são majoritariamente torres treliçadas compostas por perfis L (cantoneiras) de aço e ligações parafusadas. Para o dimensionamento destas torres existem especificações técnicas particulares a cada linha contendo informações quanto aos tipos de torre utilizados, geometria das estruturas, carregamentos e quais normas devem ser seguidas. No Brasil, a norma americana ASCE 10-15 é a principal referência quanto ao dimensionamento destas torres. Neste trabalho é feita a comparação do dimensionamento de uma torre quanto aos preceitos da ASCE 10-15 e da norma brasileira NBR 8800:2008. Através do software PLS Tower, próprio para o dimensionamento deste tipo de estrutura, foi feito o levantamento dos esforços nas barras e a partir dos roteiros de cálculo de cada norma foram construídas planilhas eletrônicas de forma a automatizar o dimensionamento de todos os elementos de uma torre completa. Após o dimensionamento foram comparados os resultados, concluindo-se que o dimensionamento de acordo com a NBR 8800:2008 resulta numa estrutura mais pesada e com a utilização de uma quantidade maior de parafusos nas ligações, acarretando no aumento do custo da torre.

**Palavras-chave:** Torres para linhas de transmissão; ASCE10-15; NBR 8800:2008.

**COMPARATIVE STUDY OF TOWERS FOR TRANSMISSION LINES DESIGN IN ACCORDANCE  
WITH STANDARDS NBR8800:2008 AND ASCE 10-15**

**Abstract**

Structures for transmission lines are essential elements in the development of a country. In Brazil, these structures are mostly lattice towers composed of steel L-profiles (angles) and bolted connections. For the design of these towers there are specific technical specifications for each line containing information regarding the types of towers used, geometry of the structures, loads and which standards must be followed. In Brazil, the American standard ASCE 10-15 is the main reference regarding the design of these towers. In this paper, a comparison is made between the design of a tower and the precepts of ASCE 10-15 and the Brazilian standard NBR 8800:2008. Using PLS Tower, a software commonly used for the design of this type of structure, the forces on the members were calculated and electronic spreadsheets were built in order to automate the design of all tower elements. After the design, the results were compared, concluding that the sizing according to NBR 8800:2008 results in a heavier structure and with the use of a greater number of bolts in the connections, resulting in an increase in the cost of the tower.

**Keywords:** Latticed towers for transmission lines; ASCE10-15; NBR 8800:2008.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, UFES 2008. Gerente de Engenharia do Produto, Brametal SA, Linhares, Espírito Santo, Brasil.

## **1 INTRODUÇÃO**

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, em nota técnica sobre a projeção do consumo e da carga de energia elétrica no horizonte decenal 2017-2026, prevê que a demanda máxima instantânea do Sistema Integrado Nacional (SIN) crescerá 3,5% ao ano, passando de 85.903 MW para 120.808 MW. Ainda de acordo com a EPE, o primeiro leilão a ser realizado em 2018 contempla 1.672 projetos, totalizando 48.713 MW de capacidade instalada. Estes novos projetos contemplam usinas fotovoltaicas, parques eólicos, usinas de geração hidrelétrica (UHEs), pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), entre outros empreendimentos.

Para chegar aos centros consumidores, a energia elétrica gerada nestes empreendimentos é transmitida através de linhas de transmissão de energia, geralmente a tensões elevadas. As tensões de transmissão no Brasil variam entre 69 kV e 800 kV, para tensões inferiores, as linhas são classificadas como linhas de distribuição e não de transmissão. (GONTIJO, 1994).

O principal elemento estrutural utilizado na transmissão de energia elétrica no Brasil são torres treliçadas de grande porte, usualmente constituídas de perfis L (cantoneiras) em aço, além de chapas também em aço. As ligações das peças são usualmente parafusadas, de forma a facilitar a montagem em campo, uma vez que boa parte das linhas existentes e a serem construídas encontram-se em locais de acesso dificultado para a execução de soldas ou outras operações que necessitem de equipamentos especiais ou energia elétrica.

No Brasil, o cálculo estrutural destas torres é norteado pela norma norte-americana ASCE 10-15 (Design of Latticed Steel Transmission Structures, American Society of Civil Engineers, 2015), no entanto, a principal referência nacional para o dimensionamento de estruturas em aço é a NBR 8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios), sendo esta a base utilizada nos cursos de engenharia brasileiros ao se tratar do dimensionamento de ligações e perfis laminados e soldados. A NBR 8800:2008 é bastante utilizada no projeto de torres para outros fins, no entanto, o mesmo não ocorre quando o assunto são torres para linhas de transmissão.

Portanto, este trabalho irá discorrer sobre o cálculo de torres para linhas de transmissão à luz destas duas normas de referência.

### **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo fazer o estudo e comparar o resultado do dimensionamento de uma torre para linhas de transmissão utilizando as duas normas supracitadas, NBR 8800:2008 e ASCE 10-15. Dessa forma, verificar se é possível tirar proveito da utilização da norma brasileira nos casos em que a especificação técnica do projeto da estrutura permita o seu uso.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Definir quais são os dados de entrada para o projeto de torres para linhas de transmissão;
- Desenvolver um passo-a-passo para o dimensionamento de barras e ligações com base na NBR 8800:2008 e na ASCE 10-15;

- Criar planilhas eletrônicas com a plataforma EXECL da Microsoft, com o intuito de simplificar o processo de dimensionamento e verificação de barras e ligações com base na NBR 8800:2008 e na ASCE 10-15.

### **1.3 Definição de torres para linhas de transmissão**

Uma linha de transmissão de energia elétrica possui diversos componentes diferentes. Estes componentes afetam o desempenho elétrico das linhas por estarem diretamente ligados ao desempenho técnico tanto do aspecto elétrico quanto do aspecto mecânico. E, isso, sem ainda descuidar do aspecto econômico.

A seguir são listados os principais componentes de uma linha de transmissão:

- Cabos condutores de energia elétrica;
- Estruturas de suporte;
- Estruturas isolantes;
- Fundações;
- Cabos para-raios;
- Aterramentos;
- Acessórios diversos, tais como espaçadores e amortecedores para cabos.

Quando se aborda o dimensionamento estrutural de uma torre, foco deste trabalho, trata-se do aspecto mecânico de uma linha. (Labegalini et al, 1992).

Gontijo (1994) define as estruturas de suporte para linhas de transmissão como sendo as estruturas que tem a finalidade de sustentar os cabos condutores e para-raios, sendo dimensionadas para resistir aos esforços mecânicos e descarregá-los nas fundações. Outra função das estruturas de suporte é manter a separação entre os cabos de forma a respeitar uma distância elétrica compatível com a tensão da linha. Essas estruturas são usualmente torres treliçadas com perfis do tipo cantoneira (perfis L) em aço galvanizado ou postes de aço, concreto ou madeira.

No Brasil, para linhas com tensão maior ou igual a 138 kV, é majoritariamente mais comum a utilização de torres treliçadas em detrimento aos postes. Estas torres se comportam como treliças espaciais, possibilitando a obtenção de estruturas leves, que podem passar de 100 metros de altura e com bom comportamento mecânico. (ELIAS, 2015).

A seguir serão discutidas as etapas que dizem respeito a etapa de cálculo estrutural de uma torre para linhas de transmissão. Não serão discutidos tópicos relativos ao projeto completo de uma torre, que ainda contempla as etapas de detalhamento (elaboração dos desenhos de montagem e fabricação) e de validação com pré-montagem e teste de carregamento em protótipo de escala real.

### **1.4 Dados de entrada para o projeto de uma torre para linhas de transmissão**

Para o cálculo estrutural de qualquer tipo de estrutura, é preciso que se conheçam três itens básicos: as cargas atuantes, as propriedades dos materiais que compõe a estrutura e sua geometria.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2013), em sua publicação Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão, define as premissas a serem seguidas para a elaboração dos relatórios em que constarão todas as características da linha: definição do traçado da linha, levantamento dos parâmetros

meteorológicos, escolha dos cabos condutores e para-raios, entre outros diversos itens. Especificamente para o projeto das estruturas suportes da linha, o ONS (2013), no item 6.13 da publicação citada, traz a definição de série de estruturas, hipóteses de carregamento e árvores de carga. Para cada linha de transmissão essas informações serão reunidas em uma especificação técnica que, posteriormente, será enviada para as empresas que executarão os projetos das estruturas suportes, que para este trabalho, são as torres treliçadas.

Entende-se como conceito de série de estruturas a definição dos tipos de estruturas que comporão a linha de transmissão de acordo com as classificações estabelecidas no item 2.2 deste trabalho. Neste momento também se determina a geometria das estruturas, indicando suas alturas máximas e mínimas e, principalmente, as distâncias elétricas, que são as distâncias entre condutores, entre condutores e estrutura e o ângulo de cobertura do cabo para-raios.

As hipóteses de carregamento e árvores de carga são elaboradas através das seguintes informações: pressões de vento extremo e alta intensidade, dados dimensionais do cabo condutor e dos cabos para-raios, trações horizontais no condutor e no cabo para-raios, coeficientes de sobrecarga, deflexão máxima da linha e vão de peso e vão de vento entre as estruturas. Para cada tipo de estrutura devem ser adotadas, no mínimo, as seguintes hipóteses de carregamento: vento extremo transversal; vento extremo longitudinal; vento extremo a 45°; vento de alta intensidade transversal; vento de alta intensidade longitudinal; vento de alta intensidade a 45°; rompimento de cabo condutor; rompimento de cabo para-raios; construção; e contenção de cascata (estrutura de suspensão). Nas árvores de carga para cada hipótese, são mostradas as cargas resultantes nas direções vertical, transversal e longitudinal para cada ponto de aplicação dos cabos condutor e para-raios. Estas cargas são mostradas já com os coeficientes de sobrecarga incorporados. Também devem ser levados em conta o peso próprio das estruturas e os esforços de vento sobre as mesmas. Estes últimos são calculados segundo a IEC 60826. (ONS, 2013).

A especificação técnica para o projeto das estruturas suportes é ainda complementada com a definição dos materiais que poderão ser utilizados para a composição das mesmas, bem como com a definição das normas e demais princípios que devem ser seguidos para o cálculo estrutural e elaboração dos desenhos de projeto e fabricação.

### **1.5 Etapa de Cálculo Estrutural**

De posse dos dados de entrada conforme explicitado no item 1.4, Gontijo (1994), afirma que o calculista, com base em experiência anterior, desenvolve a “arquitetura” da torre, ou seja, determina as aberturas superiores e inferiores das faces transversal e longitudinal, definindo o treliçamento secundário e principal a ser adotado. A partir dessa definição, o engenheiro irá calcular os esforços atuantes na estrutura e dimensionar as barras, ligações e fundações. A figura 1 ilustra a forma de uma torre conforme as deliberações expostas acima.

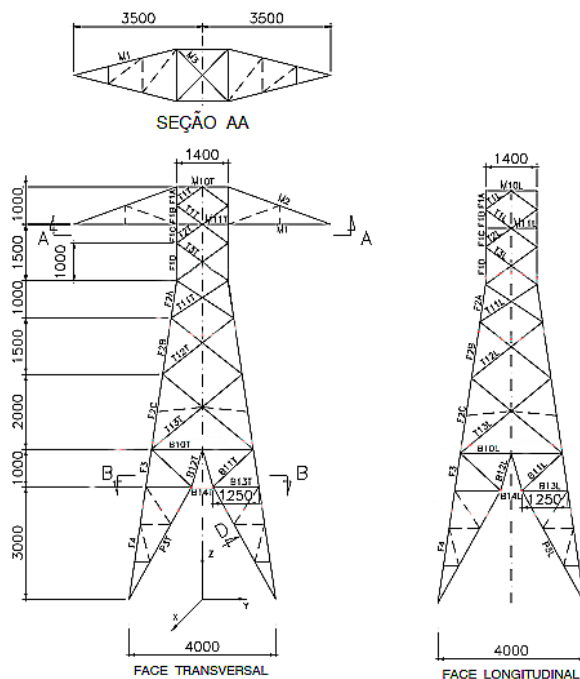


Figura 1 – Exemplo da forma de uma torre autoportante  
Fonte: Adaptado de Kaminski, 2007

De acordo com Martins et al (2009), os procedimentos para análise e dimensionamento de torres treliçadas para linhas de transmissão estão determinados na norma americana ASCE 10-15, nas recomendações internacionais da IEC 60826:2003 e na bibliografia de autores consagrados como Labegalini et al. Em todos estes casos é feita uma análise estática. Mesmo as cargas com efeitos dinâmicos, como vento ou ruptura de cabos, são substituídas por ações estáticas equivalentes.

Os dados de entrada (geometria da estrutura, hipóteses de cargas e propriedades dos materiais) são imputados em programas comerciais desenvolvidos especificamente para o dimensionamento de torres metálicas treliçadas para linhas de transmissão. Para este fim, Martins et al (2009), cita os softwares iTowers Designer desenvolvido pela empresa IMISoft Engineering Pvt Ltd e PLS Tower desenvolvido pela Power Line Systems. A saída destes programas retorna as cargas atuantes máximas em cada barra e o dimensionamento da mesma, bem como o dimensionamento de sua ligação.

Um fato importante a notar, é o conceito de família de torres. Segundo Gontijo (1994), uma família de torres é composta por estruturas formadas a partir de subpartes idênticas. Estas subpartes são:

- Corpo básico: parte comum a todas as torres. Geralmente é nessa parte que são fixados os cabos condutores e para-raios;
- Extensões: usualmente com alturas variando de 6,0 em 6,0 metros;
- Pernas: usualmente com altura variando de 1,5 metros a 9,0 metros com incrementos de 1,5 metros.

Dessa forma, com a combinação destas subpartes pode-se formar a estrutura mais adequada a atender as condições topográficas específicas do local de montagem. Cada estrutura poderia ser projetada para a condição topográfica e de carregamento específico na linha, no entanto isso aumentaria muito os custos de projeto e fabricação, uma vez que cada

torre necessitaria de um projeto específico. Justamente para que isso não ocorra é que se utiliza no projeto o conceito de família de torres. (GONTIJO, 1994)

O conceito de família de torres é então introduzido nos softwares de cálculo. São criados modelos simulando as várias combinações de subpartes e, ao ser executado, o software gera uma envoltória com as maiores cargas para cada barra, dessa forma, permitindo um dimensionamento que atenda ao mesmo tempo a todos os modelos e a todas as condições de carregamento.

Fabri (2015) aponta ainda que torres para linhas de transmissão são treliças espaciais, portanto, nos modelos estruturais as barras estão sujeitas somente a esforços de tração e compressão, uma vez que os softwares consideram que as barras se unem por meio de nós perfeitos. No entanto, na fase de detalhamento, muitas vezes, não é possível criar essas ligações perfeitas, dando origem a excentricidades e esforços de flexo-compressão ou flexo-tração nas barras.

Finalizado o dimensionamento, é possível elaborar a silhueta da estrutura. A silhueta pode ser definida como um desenho com as dimensões básicas da torre, contendo as informações de cada barra e de cada ligação. Esta silhueta então é enviada aos desenhistas projetistas que irão então desenvolver os desenhos de projeto, listas de material e desenhos de fabricação.

No exemplo a ser desenvolvido neste trabalho, para o levantamento dos esforços será utilizado o software PLS Tower e para a automatização do dimensionamento das barras e ligações serão desenvolvidas planilhas eletrônicas com a plataforma EXCEL da Microsoft com base na NBR 8800:2008 e na ASCE 10-15, permitindo a comparação entre estas normas.

## **1.6 Dimensionamento de uma torre para linha de transmissão**

Neste item serão apresentados: a torre a ser calculada, todos os dados de entrada necessários para o seu projeto (geometria, carregamento e propriedades dos materiais a serem utilizados) e o software utilizado para o levantamento dos esforços nas barras. A seguir será apresentado o passo a passo para o dimensionamento de acordo com as normas ASCE 10-15 e NBR 8800:2008, bem como a comparação dos resultados obtidos.

### **1.6.1 Apresentação da estrutura**

As informações apresentadas neste item foram extraídas do documento Série de Estruturas e Árvores de Carregamento para a linha de 138 kV Verde 4A – Verde 4 – Mimoso, elaborado pela Seta Engenharia SA (2016) e distribuído de acordo com os preceitos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013).

#### **1.6.1.1 Classificação**

De acordo com a classificação proposta por Gontijo (1994) e apresentada no item 2.1 deste trabalho, a torre a ser dimensionada pode ser classificada da seguinte maneira:

- Quanto ao número de circuitos: torre de circuito simples;
- Quanto à voltagem da linha: torre para linha de 138 kV;
- Quanto à disposição dos condutores: torre com disposição triangular;
- Quanto à forma de resistência das estruturas: torre estaiada;



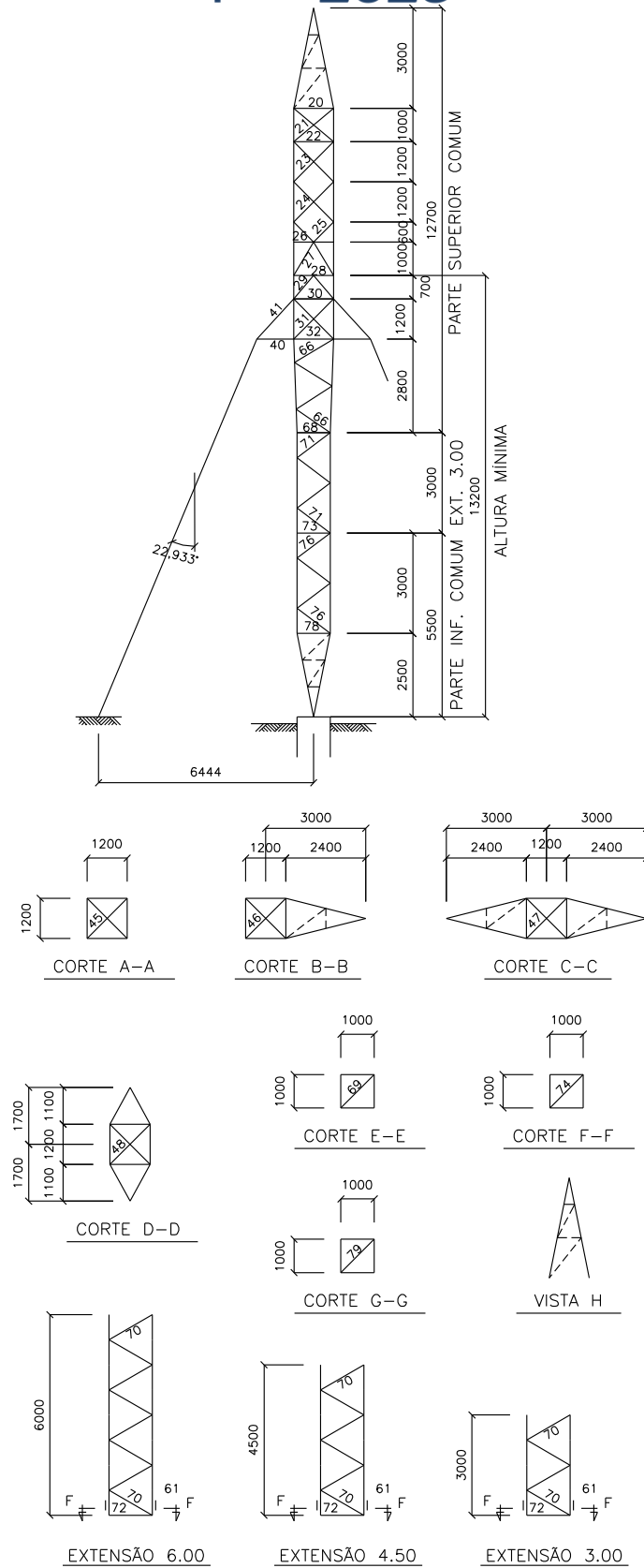


Figura 3 – Face longitudinal, cortes e vistas da silhueta da torre  
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

A respeito da geometria apresentada são feitos os seguintes comentários:

- Todas as medidas estão apresentadas em milímetro;
- Para o levantamento dos esforços será utilizado o conceito de família de torres. A partir da altura mínima (13200 mm) apresentada na figura 3, podem ser combinadas as extensões de corpo até que seja atingida a altura máxima (31200 mm) indicada na figura 2;
- As alturas máxima e mínima são consideradas a partir do ponto de fixação do condutor mais baixo em relação ao solo e não em relação ao ponto mais alto da torre;
- As barras indicadas em linha cheia são as barras calculadas e tem um número para identificação na tabela de dimensionamento a ser apresentada;
- As barras indicadas em linha tracejada são chamadas de barras redundantes de acordo com ASCE 10-15. Segundo esta mesma norma, estas barras não são calculadas e tem unicamente a função de diminuir o comprimento de flambagem das barras calculadas. Apesar disso existem critérios para o seu dimensionamento: 1) sua esbeltez deve ser limitada em 250 e 2) devem resistir a, no mínimo, 2,5% da carga atuante na barra que contraventam.

### 1.6.1.3 Carregamento

As hipóteses de carga consideradas estão indicadas na tabela 1 e os pontos indicados na tabela estão indicados na figura 4.

As cargas de vento na estrutura são calculadas de acordo com a IEC 60826:2003 através da equação abaixo:

$$F_v = q_0 \times (1 + 0,2 \times \text{sen}^2 2\phi) \times \{(S_{T1} \times C_{X_{T1}} \times \text{cos}^2 \phi) + (S_{T2} \times C_{X_{T2}} \times \text{sen}^2 \phi)\} \times G_T$$

Onde:

- $F_v$ : carga de vento agindo no centro de gravidade de um painel em kgf;
- $q_0$ : pressão dinâmica de referência em kgf/m<sup>2</sup>;
- $\phi$ : ângulo de incidência do vento com a face longitudinal do painel da torre no plano horizontal;
- $S_{T1}$ : área total projetada ortogonalmente na face longitudinal dos membros desta face no painel que se está calculando a força de vento em m<sup>2</sup>;
- $S_{T2}$ : área total projetada ortogonalmente na face transversal dos membros desta face no painel que se está calculando a força de vento em m<sup>2</sup>;
- $C_{X_{T1}}$  e  $C_{X_{T2}}$ : coeficientes de arrasto para as faces longitudinal e transversal para um vento perpendicular para cada face segundo a figura 7 da IEC-60826:2003;
- $G_T$ : fator de vento combinado em função da altura do centro de gravidade dos painéis das torres para rugosidade do terreno segundo a figura 5 da IEC-60826:2003.

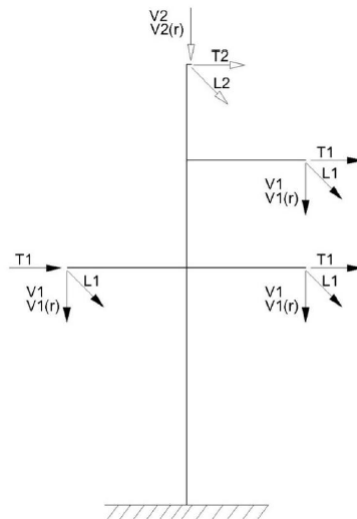


Figura 4 – Pontos de carga  
Fonte: Seta Engenharia, 2016

Tabela 1 – Hipóteses de Carga

HIPÓTESE		V1	V1(r)	T1	L1	V2	V2(r)	T2	L2	
1	Vento Extremo Transversal	1236	440	1285	0	511	187	555	0	
2	Vento Extremo a 45°	1236	440	699	29	511	187	300	0	
3	Vento Extremo Longitudinal	1236	440	88	41	511	187	42	0	
4	Vento de Alta Intensidade Transv.	1236	440	470	0	511	187	178	0	
5	Vento de Alta Intensidade a 45°	1236	440	293	29	511	187	111	0	
6	Vento de Alta Intensidade Long.	1236	440	88	41	511	187	42	0	
7	Cabos rompidos	Intactos	1236	440	88	0	511	187	42	0
8		Rompidos	882	322	44	1763	358	131	21	1200
9	Construção	2778	0	152	0	1402	0	72	0	
10	Contenção em Cascata	1236	440	0	1007	511	187	0	720	

Fonte: Adaptado de Seta Engenharia, 2016

A respeito do carregamento são feitos os seguintes comentários:

- Todas as cargas mostradas na tabela 1 estão em quilograma-força (kgf);
- Conforme apontado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013), as cargas apresentadas na tabela 1 serão aplicadas na estrutura sem a aplicação de quaisquer coeficientes de sobrecarga;
- Na tabela 1, as cargas verticais indicadas com (r), representam os esforços verticais para as torres quando aplicadas com o menor vão entre as estruturas. A mesma forma de identificação será utilizada nas tabelas de dimensionamento;
- A hipótese 7 representa a simulação do rompimento do cabo para-raios, portanto as cargas V2, T2 e L2 são equivalentes as cargas indicadas como cabos rompidos. As demais cargas serão consideradas com os valores de cabos intactos;

- A partir da hipótese 8 são criadas as seguintes hipóteses:
  - 8A: considera o cabo condutor superior direito rompido e os demais cabos intactos;
  - 8B: considera o cabo condutor inferior esquerdo rompido e os demais cabos intactos;
  - 8C: considera o cabo condutor inferior direito rompido e os demais cabos intactos;
- A pressão dinâmica de referência ( $q_0$ ) para o cálculo das cargas de vento é de 44,0 kgf/m<sup>2</sup> para as hipóteses de 1 a 3 (vento extremo) e de 100,0 kgf/m<sup>2</sup> para as hipóteses de 4 a 6 (vento de alta intensidade)
- Nas hipóteses de 7 a 10 não é considerada carga de vento atuando na estrutura.

#### **1.6.1.4 Propriedades dos Materiais**

As propriedades dos materiais utilizados estão de acordo com a Especificação Técnica para Aquisição de Estruturas Metálicas para a linha de 138 kV Verde 4A – Verde 4 – Mimoso, elaborado pela Seta Engenharia SA (2016) e distribuído de acordo com os preceitos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (2013).

As barras serão constituídas por perfis L (cantoneiras) em aço ASTM A572 Grau 60, com limite de escoamento  $F_y = 415$  MPa (4218 kgf/cm<sup>2</sup>), limite de ruptura  $F_u = 520$  MPa (5273 kgf/cm<sup>2</sup>) e módulo de elasticidade  $E = 200$  GPa (2040800 kgf/cm<sup>2</sup>).

As ligações serão do tipo parafusadas e os parafusos a serem utilizados serão de acordo com a norma ISO 898-1 Classe 5.8. Serão, portanto, parafusos da série métrica com tensão limite de ruptura  $F_u = 5200$  kgf/cm<sup>2</sup> e limite para a tensão de cisalhamento no corpo do parafuso  $F_v = 3220$  kgf/cm<sup>2</sup>. Será admitido neste trabalho que todos os planos de corte dos parafusos serão no corpo dos mesmos e, nunca em sua parte roscada, o que é praxe neste tipo de projeto.

Em projetos de torres para linhas de transmissão é mais comum a utilização de unidades como quilograma-força (kgf) e quilograma-força por centímetro quadrado (kgf/cm<sup>2</sup>), inclusive sendo estas as unidades constantes na especificação técnica utilizada como referência neste trabalho, portanto os cálculos apresentados utilizarão estas unidades de medida.

#### **1.7 Levantamento dos esforços nas barras**

Como exposto anteriormente, os esforços na estrutura foram levantados com a utilização do software PLS Tower desenvolvido pela *Power Line Systems*. O programa dispõe várias janelas e seguindo o roteiro abaixo foi possível criar os modelos:

- Foram gerados os nós com as coordenadas nas direções x, y e z de acordo com as dimensões de cada modelo. É possível fazer uso da simetria para gerar nós de maneira automática e neste momento definem-se as condições de contorno para cada nó (liberdades de giro e translação);
- Foram gerados os grupos com a definição da seção das barras com suas propriedades geométricas e de materiais de acordo com a identificação numérica mostrada nas figuras 2 e 3. O software possui uma biblioteca com as propriedades

dos materiais e das seções. Esta biblioteca pode ser alterada sempre que necessário;

- Foram gerados os membros. Os membros carregam as informações dos grupos e são gerados com a indicação do nó inicial e final para cada barra;
- Foram gerados os estais, uma vez que se trata de uma torre estaiada;
- Foram gerados os pontos de carga;
- Foram geradas as seções da estrutura. As seções são trechos específicos da torre que podem ter fatores específicos para o cálculo das cargas de vento ou do peso próprio, por exemplo.
- Foram criadas as hipóteses de carregamento, definindo todas as cargas e a respectiva norma para cálculo das cargas de vento que será utilizada.

Seguindo o roteiro exposto acima, foram criados modelos simulando as várias combinações de extensões do mastro de forma a atingir as alturas máxima e mínima conforme figuras 2 e 3, bem como modelos com alturas intermediárias. Assim, utilizando o conceito de família de torres, o software foi executado com a opção de análise de múltiplos modelos. Os modelos foram analisados com a opção de não-linearidade geométrica e, dessa forma, foi gerada uma envoltória com as maiores cargas para cada barra, dessa forma, o dimensionamento a ser realizado atenderá ao mesmo tempo a todos os modelos e a todas as hipóteses de carga. Esta envoltória com os maiores esforços para cada barra é mostrada na tabela 2.

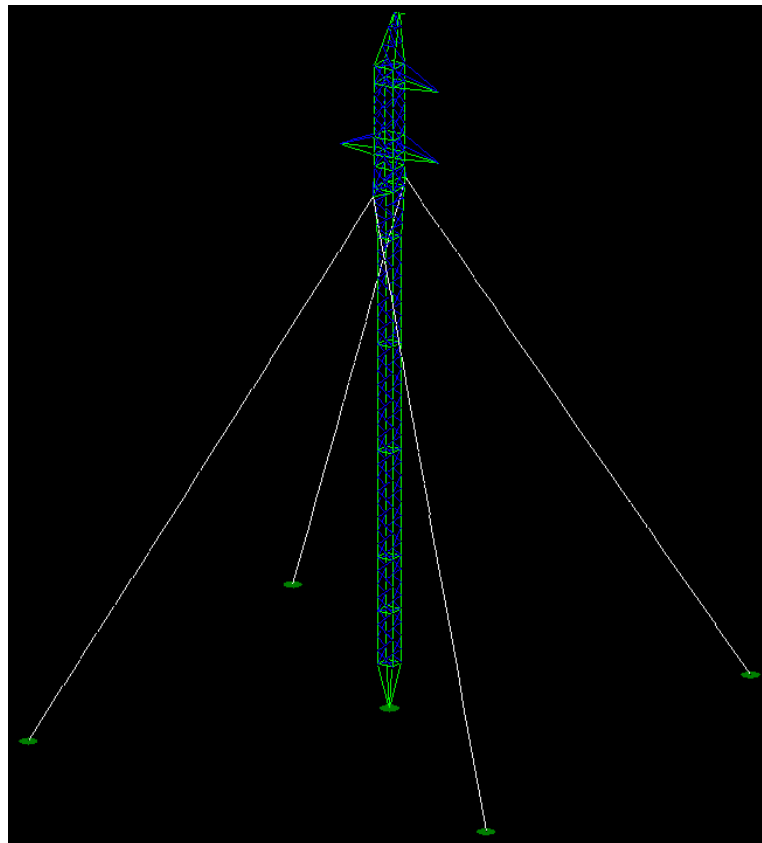


Figura 11 – Modelo para a torre mais alta no PLS Tower  
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Tabela 2 – Envoltória com as cargas máximas para cada barra

Grupo da Silhueta	Esforços de Compressão		Esforços de Tração	
	Hipótese	Carga (kgf)	Hipótese	Carga (kgf)
1	7	6041	7r	5470
2	7r	1238	7	1368
3	10	6372	10	4869
4	1	13691	9D	6268
5	8Ar	163	9B	1434
6	9D	2330	9D	2034
7	8A	2475	8Ar	2050
8	8A	1652	8A	1655
9	8A	1721	8Ar	1666
10	8Ar	1636	8A	1731
11	0	0	9E	3252
12	9D	2303	9D	2139
13	9E	2911	8Cr	1501
14	1	2000	1	1967
15	10r	2302	7	393
16	1	2293	1r	573
17	0	0	10	2059
20	9B	568	9A	252
21	10	910	10r	626
22	1	253	9D	1559
23	8A	2226	8Ar	2074
24	8Ar	2086	8A	2243
25	8A	2249	8Ar	2054
26	9E	837	10r	160
27	8A	2714	8Ar	2539
28	10r	1469	10	2384
29	10	2673	10	2660
30	0	0	1	4885
31	10r	1823	10	2144
32	1	5660	1	2041
40	1	5481	1	855
41	7	42	10r	8940
45	8Ar	296	8A	471
46	8A	596	8Ar	499
47	8C	1254	8Br	942
48	8Cr	207	8C	452
50	0	0	1	595

51	7r	2291	7	2418
52	7	865	7r	829
53	7r	1205	7	1221
54	7	563	7r	553
55	7r	674	7	690
60	1	17072	9D	7582
61	1	17026	9D	7551
62	1	11877	9D	2347
63	1	8620	0	0
65	9D	1026	9D	953
66	6	714	6	816
67	1	700	1	450
68	1	697	1	373
69	1	170	0	0
70	1	1495	1	1477
71	6	505	6	443
72	6r	16	2	73
73	9D	48	1	84
74	2	30	8B	24
75	1	1457	1	1418
76	6	691	6	637
77	9D	115	1	1070
78	9D	111	1	1094
79	0	0	1	567
80	8A	3565	8Ar	2221
81	8Ar	754	9C	3709
90	8B	3735	8Cr	2319
91	10r	752	9C	3710

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

### 1.8 Roteiro de Dimensionamento de acordo com a ASCE 10-15

Serão descritos nos itens a seguir os roteiros para o dimensionamento de cantoneiras de abas iguais, principal seção utilizada em projetos de torres para linhas de transmissão no Brasil, respectivamente aos esforços de tração e compressão. Também será apresentado o roteiro para o dimensionamento das ligações parafusadas.

## 1.8.1 Dimensionamento à tração

Para o dimensionamento à tração, o esforço atuante na barra deve ser inferior ao esforço resistente de tração, que por sua vez é dado por:

$$F_{Rt} = F_y \times A_n$$

Onde

$F_y$  = tensão limite de escoamento do aço

$A_n$  = área líquida da cantoneira

A área líquida da cantoneira é calculada como sendo a área bruta descontada das perdas de seção causada pelos furos. Para cada furo, se desconta o valor da espessura da barra multiplicada pelo diâmetro do furo. Para furos realizados com punção, adiciona-se 1,6 mm no diâmetro do furo considerado, enquanto para furos realizados com broca, não é feito nenhum acréscimo. Se houver furos em diagonal ou ziguezague, no cálculo da área líquida deve-se reduzir a contribuição de cada furo na linha considerada e adicionar-se o valor  $s^2/4g$  para cada diagonal considerada na linha, sendo  $s$  o espaçamento paralelo à linha e  $g$  o espaçamento transversal à linha. Nestes casos, o valor crítico para a área líquida é o que resultar no menor valor.

Como simplificação neste trabalho, por não se ter os desenhos de projeto da torre, será feita a seguinte simplificação: para barras detalhadas com ligação em apenas uma aba será descontado um furo para o cálculo da área líquida, já para barras comumente detalhadas com parafusos nas duas abas, serão descontados dois furos para o cálculo da área líquida.

## 1.8.2 Dimensionamento à compressão

Para o dimensionamento à compressão, o esforço atuante na barra deve ser inferior ao esforço resistente de compressão, que, por sua vez é dado por:

$$F_{Rc} = F_c \times A_g, \text{ onde}$$

$F_c$  = tensão limite de compressão

$A_g$  = área bruta da cantoneira

A tensão limite de compressão  $F_c$  deve ser atender as seguintes condições abaixo indicadas:

$$\text{Se } kL/r \leq C_c, \text{ então: } F_c = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_{cr}$$

$$\text{Se } kL/r > C_c, \text{ então: } F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2}$$

Com:  $C_c = \pi (2E / F_y)^{1/2}$ , onde

$F_y$  = tensão limite de escoamento do aço, em kgf/cm<sup>2</sup>

$F_{cr}$  = tensão crítica de compressão, em kgf/cm<sup>2</sup>;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal, em kgf/cm<sup>2</sup>

$kL/r$  = esbeltez efetiva

$L$  = comprimento destravado da barra

$K$  = coeficiente de comprimento de flambagem

$r$  = raio de giração.

A tensão crítica de compressão para cantoneiras ( $F_{cr}$ ) é dependente da compacidade da peça. A compacidade é a relação entre as dimensões da parte reta da aba e da espessura ( $w/t$ ), podendo ser visualizada na figura 12, em que a medida  $w$  é igual ao comprimento da aba (a) diminuído da espessura ( $t$ ) e do raio de laminação ( $R$ ).

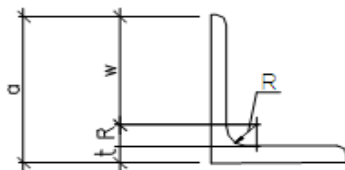


Figura 5 – Seção transversal típica de uma cantoneira  
Fonte: Adaptado de ASCE 10-15

Portanto, o valor de  $F_{cr}$  deve ser calculado conforme as condições abaixo:

- Se  $w / t \leq (w / t)_{lim}$ ,  $F_{cr} = F_y$
- Se  $(w / t)_{lim} < w / t \leq 0,846 (E / F_y)^{1/2}$ ,  $F_{cr} = [1,677 - 0,677 (w / t) / (w / t)_{lim}] F_y$
- Se  $w / t > 0,846 (E / F_y)^{1/2}$ ,  $F_{cr} = 0,3276 \times E / (w / t)^2$

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

A esbeltez efetiva é calculada de acordo com as seguintes condições:

- Para  $L/r < 120$   
Barras com cargas concêntricas em ambas as extremidades:  
 $k.L/r = L/r$  (Curva K = 1)  
Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra;  
 $k.L/r = 0.75L/r + 30$  (Curva K = 2)  
Barras com cargas excêntricas em ambas as extremidades;  
 $k.L/r = 0.50L/r + 60$  (Curva K = 3)
- Para  $k.L/r \geq 120$ ,  $k.L/r = L/r$  (Curva K = 4)

O índice K (1, 2, 3 ou 4) será utilizado na tabela de dimensionamento para indicar qual condição será utilizada para o cálculo da esbeltez efetiva.

É recomendado ainda limitar a esbeltez em: 150 para montantes comprimidos (barras externas à silhueta da torre, com exceção das barras que sustentam os cabos para-raios e cabos condutores); 200 para demais barras comprimidas; 375 para barras sempre tracionadas.

### 1.8.3 Dimensionamento das ligações parafusadas

De acordo com os itens 4.3 e 4.4 da ASCE 10-15, as ligações parafusadas devem ser verificadas da seguinte forma:

- Cisalhamento dos parafusos: o esforço resistente ao cisalhamento de uma ligação parafusada é calculado como:  $n \times A_p \times F_v$ , onde  $n$  é o número de planos de corte da ligação,  $F_v$  é a tensão limite de cisalhamento e  $A_p$  é a área do parafuso, podendo ser considerada igual a área do corpo do parafuso ou igual a área da raiz da rosca, dependendo de onde esteja localizado o plano de corte. Neste trabalho será admitido que o plano de corte está sempre localizado no corpo do parafuso.
- Esmagamento do membro ligado: o esforço resistente ao esmagamento da ligação é calculado como:  $1,5 \times F_u \times n (t \times d_p)$ , onde  $F_u$  é a tensão limite de ruptura do

membro ligado,  $n$  é o número de parafusos na ligação,  $t$  é a espessura do membro ligado e  $d_p$  é o diâmetro do parafuso.

#### 1.8.4 Tabela de Dimensionamento de acordo com a ASCE 10-15

Seguindo o roteiro apresentado nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, utilizando o Microsoft Excel, a definição de geometria do item 4.1.2, as propriedades dos materiais do item 4.1.3 e os esforços em cada barra do item 4.2, foi possível dimensionar as barras e as ligações parafusadas conforme as tabelas a seguir:

Tabela 3 – Dimensionamento das barras segundo a ASCE 10-15

Grupo	Esforços [kgf]		Perfil	Área [cm <sup>2</sup> ]		Esbeltez				Esforços Limites [kgf]	
	Compressão	Tração		Ag	An	L [cm]	r [cm]	L/r	K	Compressão	Tração
1	6041	5470	L 50 x 3.0	2.96	2.14	82	0.99	82	1	6484	9043
2	1238	1368	L 45 x 3.0	2.66	1.84	128	0.89	143	4	2607	7778
3	6372	4869	L 45 x 4.0	3.49	2.40	120	1.36	88	1	8721	10132
4	13691	6268	L 65 x 5.0	6.31	4.95	120	1.29	93	1	14499	20879
5	163	1434	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
6	2330	2034	L 40 x 3.0	2.35	1.94	78	0.78	100	3	3907	8191
7	2475	2050	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	1.22	98	3	3971	8191
8	1652	1655	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3615	8191
9	1721	1666	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
10	1636	1731	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
11	0	3252	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
12	2303	2139	L 40 x 3.0	2.35	1.94	78	0.78	100	3	3907	8191
13	2911	1501	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	1.22	98	3	3971	8191
14	2000	1967	L 40 x 3.0	2.35	1.94	92	0.78	118	3	3337	8191
15	2302	393	L 40 x 4.0	3.08	2.54	120	0.77	156	4	2554	10697
16	2293	573	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
17	0	2059	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
20	568	252	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
21	910	626	L 40 x 3.0	2.35	1.94	78	0.78	100	3	3907	8191
22	253	1559	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
23	2226	2074	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
24	2086	2243	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
25	2249	2054	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3619	8191
26	837	160	L 40 x 3.0	2.35	1.94	60	0.78	77	3	4882	8191
27	2714	2539	L 45 x 3.0	2.66	2.25	117	0.89	131	4	3122	9499
28	1469	2384	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	1.22	98	3	3971	8191
29	2673	2660	L 40 x 3.0	2.35	1.94	92	0.78	118	3	3337	8191

Grupo	Esforços [kgf]		Perfil	Área [cm <sup>2</sup> ]		Esbeltez				Esforços Limites [kgf]	
	Compressão	Tração		Ag	An	L [cm]	r [cm]	L/r	K	Compressão	Tração
30	0	4885	L 40 x 3.0	2.35	1.94	120	0.78	154	4	2000	8191
31	1823	2144	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
32	5660	2041	L 60 x 4.0	4.72	4.18	120	1.19	101	3	7797	17614
40	5481	855	L 60 x 4.0	4.72	4.18	125	1.19	105	3	7492	17614
41	42	8940	L 40 x 4.0	3.08	2.54	174	0.77	225	4	1222	10697
45	296	471	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
46	596	499	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
47	1254	942	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
48	207	452	L 40 x 3.0	2.35	1.94	85	0.78	109	3	3617	8191
50	0	595	L 40 x 3.0	2.35	1.94	15	1.22	12	3	7642	8191
51	2291	2418	L 40 x 3.0	2.35	1.94	87	0.78	111	3	3536	8191
52	865	829	L 40 x 3.0	2.35	1.94	54	0.78	69	3	5267	8191
53	1205	1221	L 40 x 3.0	2.35	1.94	115	0.78	148	4	2162	8191
54	563	553	L 40 x 3.0	2.35	1.94	84	0.78	108	3	3652	8191
55	674	690	L 40 x 3.0	2.35	1.94	148	0.78	190	4	1308	8191
60	17072	7582	L 75 x 5.0	7.36	6.00	168	2.31	73	1	19668	25308
61	17026	7551	L 75 x 5.0	7.36	6.00	180	2.31	78	1	18618	25308
62	11877	2347	L 65 x 5.0	7.36	6.00	180	2.31	78	1	15039	20879
63	8620	0	L 50 x 4.0	3.90	2.81	86	0.98	88	1	9831	11861
65	1026	953	L 40 x 3.0	2.35	1.94	117	0.78	150	4	2100	8191
66	714	816	L 40 x 3.0	2.35	1.94	136	0.78	174	4	1562	8191
67	700	450	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
68	697	373	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
69	170	0	L 40 x 3.0	2.35	1.94	64	0.78	82	3	4658	8191
70	1495	1477	L 40 x 3.0	2.35	1.94	117	0.78	150	4	2097	8191
71	505	443	L 40 x 3.0	2.35	1.94	117	0.78	150	4	2100	8191
72	16	73	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
73	48	84	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
74	30	24	L 40 x 3.0	2.35	1.94	127	0.78	163	4	1777	8191
75	1457	1418	L 40 x 3.0	2.35	1.94	117	0.78	150	4	2097	8191
76	691	637	L 40 x 3.0	2.35	1.94	117	0.78	150	4	2100	8191
77	115	1070	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
78	111	1094	L 40 x 3.0	2.35	1.94	90	0.78	115	3	3417	8191
79	0	567	L 40 x 3.0	2.35	1.94	64	0.78	82	3	4659	8191
80	3565	2221	L 50 x 3.0	2.96	2.55	124	0.99	125	4	3819	10764
81	754	3709	L 50 x 3.0	2.96	2.55	267	1.52	176	4	1935	10764
90	3735	2319	L 50 x 3.0	2.96	2.55	124	0.99	125	4	3819	10764
91	752	3710	L 50 x 3.0	2.96	2.55	267	1.52	176	4	1935	10764

Tabela 4 – Dimensionamento das ligações parafusadas segundo a ASCE 10-15

Grupo	Esforços [kgf]		Parafusos		Esforços Limites Ligações [kgf]	
	Compressão	Tração	Quant.	Diâmetro	Esmagamento	Cisalhamento
1	6041	5470	4	12	11390	14567
2	1238	1368	4	12	11390	14567
3	6372	4869	4	12	15186	14567
4	13691	6268	4	12	18983	14567
5	163	1434	1	12	2847	3642
6	2330	2034	1	12	2847	3642
7	2475	2050	1	12	2847	3642
8	1652	1655	1	12	2847	3642
9	1721	1666	1	12	2847	3642
10	1636	1731	1	12	2847	3642
11	0	3252	2	12	5695	7283
12	2303	2139	1	12	2847	3642
13	2911	1501	2	12	5695	7283
14	2000	1967	1	12	2847	3642
15	2302	393	1	12	3797	3642
16	2293	573	1	12	2847	3642
17	0	2059	1	12	2847	3642
20	568	252	1	12	2847	3642
21	910	626	1	12	2847	3642
22	253	1559	1	12	2847	3642
23	2226	2074	1	12	2847	3642
24	2086	2243	1	12	2847	3642
25	2249	2054	1	12	2847	3642
26	837	160	1	12	2847	3642
27	2714	2539	1	12	2847	3642
28	1469	2384	1	12	2847	3642
29	2673	2660	1	12	2847	3642
30	0	4885	2	12	5695	7283
31	1823	2144	1	12	2847	3642
32	5660	2041	2	12	7593	7283
40	5481	855	2	12	7593	7283
41	42	8940	3	12	11390	10925
45	296	471	1	12	2847	3642
46	596	499	1	12	2847	3642
47	1254	942	1	12	2847	3642
48	207	452	1	12	2847	3642
50	0	595	1	12	2847	3642

51	2291	2418	1	12	2847	3642
52	865	829	1	12	2847	3642
53	1205	1221	1	12	2847	3642
54	563	553	1	12	2847	3642
55	674	690	1	12	2847	3642
60	17072	7582	6	12	28474	21850
61	17026	7551	6	12	28474	21850
62	11877	2347	6	12	28474	21850
63	8620	0	4	12	15186	14567
65	1026	953	1	12	2847	3642
66	714	816	1	12	2847	3642
67	700	450	1	12	2847	3642
68	697	373	1	12	2847	3642
69	170	0	1	12	2847	3642
70	1495	1477	1	12	2847	3642
71	505	443	1	12	2847	3642
72	16	73	1	12	2847	3642
73	48	84	1	12	2847	3642
74	30	24	1	12	2847	3642
75	1457	1418	1	12	2847	3642
76	691	637	1	12	2847	3642
77	115	1070	1	12	2847	3642
78	111	1094	1	12	2847	3642
79	0	567	1	12	2847	3642
80	3565	2221	2	12	5695	7283
81	754	3709	2	12	5695	7283
90	3735	2319	2	12	5695	7283
91	752	3710	2	12	5695	7283

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

### 1.9 Roteiro de Dimensionamento de acordo com a NBR 8800:2008

Serão descritos nos itens a seguir os roteiros para o dimensionamento respectivamente aos esforços de tração e compressão para cantoneiras de abas iguais segundo a NBR 8800:2008. Também será apresentado o roteiro para o dimensionamento das ligações parafusadas.

Os esforços atuantes utilizados para o dimensionamento serão os esforços apresentados na tabela 2 deste trabalho e não levarão em conta os coeficientes de ponderação de ações e as condições de combinação de ações apresentados no item 4.7 da NBR 8800, uma vez que no projeto de linhas de transmissão, segundo o ONS (2013), as cargas e hipóteses apresentadas na Especificação Técnica da Linha de Transmissão já são as condições finais de carregamento e não se deve acrescentar qualquer outro coeficiente de ponderação.

Como a ASCE 10-15 não traz critérios de dimensionamento equivalentes ao estado limite de serviço (ELS) da NBR 8800:2008, para fazer uma comparação consistente entre as normas, neste trabalho será avaliado somente o roteiro de dimensionamento para o estado limite último (ELU).

### 1.9.1 Dimensionamento à tração

Para o dimensionamento à tração deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}, \text{ onde:}$$

$N_{t,Sd}$  = esforço de tração atuante na barra;

$N_{t,Rd}$  = esforço de tração resistente de cálculo determinada de acordo com os critérios abaixo.

Para o cálculo do esforço de tração resistente de cálculo devem ser observados os dois critérios abaixo, sendo seu valor o menor entre os dois resultados:

- 1) Escoamento da seção bruta:  $N_{t,Rd} = A_g F_y / \gamma_{a1}$
- 2) Ruptura da seção líquida:  $N_{t,Rd} = A_e F_u / \gamma_{a2}$

Onde:

$F_y$  = tensão limite de escoamento do aço

$F_u$  = tensão limite de ruptura do aço

$\gamma_{a1} = 1,10$ , coeficiente de ponderação da resistência quanto ao escoamento

$\gamma_{a2} = 1,35$ , coeficiente de ponderação da resistência quanto à ruptura

$A_g$  = área bruta da cantoneira

$A_e = A_n \times C_t$ , área líquida efetiva da cantoneira,

Para o cálculo da área líquida efetiva de uma cantoneira, deve ser levada em conta a área líquida ( $A_n$ ) da seção. A área líquida da seção é calculada de forma similar ao roteiro apresentado no item 4.3.1, com a exceção de que, para cada furo punccionado deve ser adicionado 2,0 mm ao diâmetro do furo, ao invés de 1,6 mm, como indicado na ASCE 10-15. Para cantoneiras com ligação parafusadas, o fator de redução  $C_t$  é definido de acordo com as seguintes condições:

- 1) Cantoneiras com ligações nas duas abas:  $C_t = 1,00$
- 2) Cantoneiras com ligação em uma aba:  $C_t = 1 - e_c/l_c$ , onde  $e_c$  é a excentricidade da ligação igual a distância do centro geométrico da seção ao plano de cisalhamento da seção e  $l_c$  é o comprimento efetivo da ligação igual a distância do primeiro ao último parafuso da linha de furação com maior número de parafusos na direção do esforço. No entanto, o valor máximo para  $C_t$  é 0,90 e não são permitidas ligações com  $C_t$  inferior a 0,60.

Assim como realizado no item 4.3.1, como simplificação neste trabalho, será feita uma simplificação para o cálculo da área líquida efetiva: para barras detalhadas com ligação em apenas uma aba será descontado um furo para o cálculo da área líquida e  $C_t$  será considerado igual a 0,90, já para barras comumente detalhadas com parafusos nas duas abas, serão descontados dois furos para o cálculo da área líquida e  $C_t$  será considerado igual a 1,00.

Como recomendação, a NBR 8800:2008 limita em 300 o valor do índice de esbeltez para barras tracionadas em condições de trabalho equivalente às das cantoneiras em uma torre para linhas de transmissão.

### 1.9.2 Dimensionamento à compressão

Para o dimensionamento à tração deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}, \text{ onde:}$$

$N_{c,Sd}$  = esforço axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  = esforço axial de compressão resistente de cálculo.

O esforço axial de compressão resistente de cálculo é calculado da seguinte forma:

$$N_{c,Rd} = \chi Q A_g F_y / \gamma_{a1}$$

$\chi$  = fator de redução associado à resistência à compressão

$A_g$  = área bruta da seção transversal da barra

$F_y$  = tensão limite de escoamento do aço

$\gamma_{a1} = 1,10$ , coeficiente de ponderação da resistência quanto ao escoamento

$Q$  = fator de redução total associado à flambagem local

O fator de redução associado à compressão  $\chi$ , é dado por:

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5: \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

Onde  $\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido calculado conforme a seguir:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}}$$

Onde  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica calculada de acordo com Anexo E da NBR 8800:2008. Para cantoneiras de abas iguais,  $N_e$  é calculado da seguinte forma:

1) Para cantoneiras de abas iguais com ligação nas duas abas:

$$N_e = \pi^2 E I / (K L)^2$$

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$I$  = momento de inércia em relação aos eixos  $x$  ou  $y$

$KL$  = comprimento de flambagem por flexão em relação aos eixos  $x$  ou  $y$ . Como as ligações serão consideradas rotuladas nos dois extremos,  $K = 1,0$ .

2) Para cantoneiras de abas iguais com ligação em somente uma aba:

$$N_e = \pi^2 E I_{x1} / (K_{x1} L_{x1})^2, \text{ onde:}$$

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$I_{x1}$  = momento de inércia em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$K_{x1} L_{x1}$  = comprimento de flambagem equivalente dado por:

a) Quando  $0 \leq L_{x1}/r_{x1} \leq 80$ :  $K_{x1} L_{x1} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1}$

b) Quando  $L_{x1}/r_{x1} > 80$ :  $K_{x1} L_{x1} = 32r_{x1} + 1,25L_{x1}$

Onde  $L_{x1}$  é o comprimento da cantoneira tomado entre os pontos de trabalho e  $r_{x1}$  é o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo a aba conectada.

O fator de redução total associado à flambagem local,  $Q$ , é calculado de acordo com o anexo F da NBR 8800:2008:

$$Q = Q_s Q_a, \text{ onde:}$$

$Q_s$  = fator de redução que leva em conta os elementos da seção com uma borda longitudinal vinculada (elementos AL).

$Q_o$  = fator de redução que leva em conta os elementos da seção com duas bordas longitudinais vinculadas (elementos AA).

Como cantoneiras só possuem elementos AL,  $Q = Q_s$ , onde  $Q_s$  é dado por:

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,53 E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Onde  $b$  é a largura da aba da cantoneira. Para valores de  $b/t$  menores que  $0,45 (E/f_y)^{0,5}$ , adota-se  $Q_s = 1,00$ .

O índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o produto  $KL$  e o raio de giração correspondente  $r$ , portanto  $KL/r$ , não deve ser superior a 200.

### 1.9.3 Dimensionamento das ligações parafusadas

Assumindo que em uma torre para linhas de transmissão, as ligações são parafusadas, os parafusos estão sujeitos somente ao cisalhamento e a estrutura foi detalhada de tal forma que os planos de corte passam sempre pelo corpo do parafuso, a NBR 8800:2008 recomenda que sejam feitas as verificações quanto ao cisalhamento do parafuso (item 6.3.3.2 da norma) e quanto a pressão de contato nos furos (item 6.3.3.3).

O esforço resistente ao cisalhamento de um parafuso,  $F_{v,Rd}$ , é dado por:

$$F_{v,Rd} = 0,4 A_b f_{ub} / \gamma_{a2}, \text{ onde:}$$

$A_b = 0,25 \pi d_b^2$ , onde  $d_b$  é o diâmetro do corpo do parafuso (parte sem rosca)

$f_{ub}$  = tensão limite de ruptura do aço do parafuso

$\gamma_{a2} = 1,35$ , coeficiente de ponderação da resistência quanto ao cisalhamento

Para furos padrão, quanto a pressão de contato, considerando que a deformação no furo é uma limitação para o projeto, deve ser feita a seguinte verificação:

$$F_{c,Rd} = 1,2 l_f t f_u / \gamma_{a2} \leq 2,4 d_b t f_u / \gamma_{a2}, \text{ onde:}$$

$l_f$  = distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre. Adotando  $l_f = 2d_b$ , toma-se  $F_{c,Rd}$  igual a seu limite superior.

$t$  = espessura da parte ligada

$f_u$  = tensão limite de ruptura do aço da parede do furo

$\gamma_{a2} = 1,35$ , coeficiente de ponderação da resistência quanto ao cisalhamento

Observação: o item 6.1.5.2 da NBR 8800:2008 recomenda que a força solicitante mínima para o dimensionamento das ligações deve ser de 45 kN (aproximadamente 4500 kgf), no entanto neste trabalho, para não penalizar demais a comparação com os critérios da ASCE 10-15, serão utilizados os esforços atuantes conforme indicados na tabela 2, mesmo que estes sejam inferiores a 4500 kgf.

#### 1.9.4 Tabela de Dimensionamento de acordo com a NBR 8800:2008

Seguindo o roteiro apresentado nos itens 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3, utilizando o Microsoft Excel, a definição de geometria do item 4.1.2, as propriedades dos materiais do item 4.1.3 e os esforços em cada barra do item 4.2, foi possível dimensionar as barras e as ligações parafusadas conforme as tabelas a seguir:

Tabela 5 – Dimensionamento das barras segundo a NBR 8800:2008

Grupo	Esforços [kgf]				Perfil	Área [cm <sup>2</sup> ]		Esbeltez			Esforços Limites [kgf]	
	Compressão		Tração			Ag	Ae	L [cm]	r [cm]	L/r	Compressão	Tração
1	7	6041	7R	5470	L 50 x 3.0	2.96	2.12	82	0.99	82	8006	11350
2	7R	1238	7	1368	L 45 x 3.0	2.66	1.82	128	0.89	143	4645	10200
3	10	6372	10	4869	L 45 x 4.0	3.49	2.37	120	1.36	88	6746	13383
4	1	13691	9D	6268	L 65 x 5.0	6.31	4.91	120	1.29	93	17296	24196
5	8AR	163	9B	1434	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
6	9D	2330	9D	2034	L 40 x 3.0	2.35	1.74	78	0.78	100	3667	9011
7	8A	2475	8AR	2050	L 45 x 4.0	3.49	2.64	120	1.36	88	2757	13383
8	8A	1652	8A	1655	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3224	9011
9	8A	1721	8AR	1666	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
10	8AR	1636	8A	1731	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
11	0	0	9E	3252	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
12	9D	2303	9D	2139	L 40 x 3.0	2.35	1.74	78	0.78	100	3667	9011
13	9E	2911	8CR	1501	L 50 x 4.0	3.90	3.01	120	1.52	79	3621	14955
14	1	2000	1	1967	L 40 x 3.0	2.35	1.74	92	0.78	118	2818	9011
15	10R	2302	7	393	L 40 x 4.0	3.08	2.27	120	0.77	156	2354	11810
16	1	2293	1R	573	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
17	0	0	10	2059	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
20	9B	568	9A	252	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
21	10	910	10R	626	L 40 x 3.0	2.35	1.74	78	0.78	100	3667	9011
22	1	253	9D	1559	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
23	8A	2226	8AR	2074	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
24	8AR	2086	8A	2243	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
25	8A	2249	8AR	2054	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3230	9011
26	9E	837	10R	160	L 40 x 3.0	2.35	1.74	60	0.78	77	4859	9011
27	8A	2714	8AR	2539	L 45 x 4.0	3.49	2.64	117	0.87	134	3427	13383
28	10R	1469	10	2384	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	1.22	98	1550	9011
29	10	2673	10	2660	L 40 x 3.0	2.35	1.74	92	0.78	118	2818	9011
30	0	0	1	4885	L 40 x 3.0	2.35	1.74	120	0.78	154	1810	9011
31	10R	1823	10	2144	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
32	1	5660	1	2041	L 60 x 4.0	4.72	3.74	120	1.19	101	7108	18099
40	1	5481	1	855	L 60 x 4.0	4.72	3.74	125	1.19	105	6684	18099

41	7	42	10R	8940	L 40 x 4.0	3.08	2.27	174	0.77	225	1231	11810
45	8AR	296	8A	471	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
46	8A	596	8AR	499	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
47	8C	1254	8BR	942	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
48	8CR	207	8C	452	L 40 x 3.0	2.35	1.74	85	0.78	109	3227	9011
50	0	0	1	595	L 40 x 3.0	2.35	1.74	15	1.22	12	4978	9011
51	7R	2291	7	2418	L 40 x 3.0	2.35	1.74	87	0.78	111	3105	9011
52	7	865	7R	829	L 40 x 3.0	2.35	1.74	54	0.78	69	5119	9011
53	7R	1205	7	1221	L 40 x 3.0	2.35	1.74	115	0.78	148	1935	9011
54	7	563	7R	553	L 40 x 3.0	2.35	1.74	84	0.78	108	3280	9011
55	7R	674	7	690	L 40 x 3.0	2.35	1.74	148	0.78	190	1251	9011
60	1	17072	9D	7582	L 75 x 6.0	8.75	7.07	168	2.30	73	20945	33552
61	1	17026	9D	7551	L 75 x 6.0	8.75	7.07	180	2.30	78	19623	33552
62	1	11877	9D	2347	L 65 x 6.0	7.48	5.80	180	1.98	91	13857	28682
63	1	8620	0	0	L 50 x 4.0	3.90	2.78	86	0.98	88	11288	14955
65	9D	1026	9D	953	L 40 x 3.0	2.35	1.74	117	0.78	150	1887	9011
66	6	714	6	816	L 40 x 3.0	2.35	1.74	136	0.78	174	1461	9011
67	1	700	1	450	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
68	1	697	1	373	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
69	1	170	0	0	L 40 x 3.0	2.35	1.74	64	0.78	82	4665	9011
70	1	1495	1	1477	L 40 x 3.0	2.35	1.74	117	0.78	150	1885	9011
71	6	505	6	443	L 40 x 3.0	2.35	1.74	117	0.78	150	1887	9011
72	6R	16	2	73	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
73	9D	48	1	84	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
74	2	30	8B	24	L 40 x 3.0	2.35	1.74	127	0.78	163	1635	9011
75	1	1457	1	1418	L 40 x 3.0	2.35	1.74	117	0.78	150	1885	9011
76	6	691	6	637	L 40 x 3.0	2.35	1.74	117	0.78	150	1887	9011
77	9D	115	1	1070	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
78	9D	111	1	1094	L 40 x 3.0	2.35	1.74	90	0.78	115	2932	9011
79	0	0	1	567	L 40 x 3.0	2.35	1.74	64	0.78	82	4665	9011
80	8A	3565	8AR	2221	L 50 x 4.0	3.90	3.01	124	0.98	126	4164	14955
81	8AR	754	9C	3709	L 50 x 4.0	3.90	3.01	267	1.52	176	986	14955
90	8B	3735	8CR	2319	L 50 x 4.0	3.90	3.01	124	0.98	126	4164	14955
91	10R	752	9C	3710	L 50 x 4.0	3.90	3.01	267	1.52	176	986	14955

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Tabela 6 – Dimensionamento das ligações parafusadas segundo a NBR 8800:2008

Grupo	Esforços [kgf]				Parafusos		Esforços Limites Ligações [kgf]	
	Compressão		Tração		Quant.	Diâm.	Esmagamento	Cisalhamento
1	7	6041	7R	5470	4	12	13499	6970
2	7R	1238	7	1368	4	12	13499	6970
3	10	6372	10	4869	4	12	17999	6970
4	1	13691	9D	6268	8	12	44996	13940
5	8AR	163	9B	1434	1	12	3375	1743
6	9D	2330	9D	2034	2	12	6749	3485
7	8A	2475	8AR	2050	2	12	8999	3485
8	8A	1652	8A	1655	1	12	3375	1743
9	8A	1721	8AR	1666	1	12	3375	1743
10	8AR	1636	8A	1731	1	12	3375	1743
11	0	0	9E	3252	2	12	6749	3485
12	9D	2303	9D	2139	2	12	6749	3485
13	9E	2911	8CR	1501	2	12	8999	3485
14	1	2000	1	1967	2	12	6749	3485
15	10R	2302	7	393	2	12	8999	3485
16	1	2293	1R	573	2	12	6749	3485
17	0	0	10	2059	1	12	3375	1743
20	9B	568	9A	252	2	12	6749	3485
21	10	910	10R	626	1	12	3375	1743
22	1	253	9D	1559	1	12	3375	1743
23	8A	2226	8AR	2074	2	12	6749	3485
24	8AR	2086	8A	2243	2	12	6749	3485
25	8A	2249	8AR	2054	2	12	6749	3485
26	9E	837	10R	160	1	12	3375	1743
27	8A	2714	8AR	2539	2	12	8999	3485
28	10R	1469	10	2384	2	12	6749	3485
29	10	2673	10	2660	2	12	6749	3485
30	0	0	1	4885	3	12	10124	5228
31	10R	1823	10	2144	2	12	6749	3485
32	1	5660	1	2041	4	12	17999	6970
40	1	5481	1	855	4	12	17999	6970
41	7	42	10R	8940	6	12	26998	10455
45	8AR	296	8A	471	1	12	3375	1743
46	8A	596	8AR	499	1	12	3375	1743
47	8C	1254	8BR	942	1	12	3375	1743
48	8CR	207	8C	452	1	12	3375	1743
50	0	0	1	595	1	12	3375	1743

51	7R	2291	7	2418	2	12	6749	3485
52	7	865	7R	829	1	12	3375	1743
53	7R	1205	7	1221	1	12	3375	1743
54	7	563	7R	553	1	12	3375	1743
55	7R	674	7	690	1	12	3375	1743
60	1	17072	9D	7582	10	12	67494	17425
61	1	17026	9D	7551	10	12	67494	17425
62	1	11877	9D	2347	8	12	53996	13940
63	1	8620	0	0	5	12	22498	8713
65	9D	1026	9D	953	1	12	3375	1743
66	6	714	6	816	1	12	3375	1743
67	1	700	1	450	1	12	3375	1743
68	1	697	1	373	1	12	3375	1743
69	1	170	0	0	1	12	3375	1743
70	1	1495	1	1477	1	12	3375	1743
71	6	505	6	443	1	12	3375	1743
72	6R	16	2	73	1	12	3375	1743
73	9D	48	1	84	1	12	3375	1743
74	2	30	8B	24	1	12	3375	1743
75	1	1457	1	1418	1	12	3375	1743
76	6	691	6	637	1	12	3375	1743
77	9D	115	1	1070	1	12	3375	1743
78	9D	111	1	1094	1	12	3375	1743
79	0	0	1	567	1	12	3375	1743
80	8A	3565	8AR	2221	3	12	13499	5228
81	8AR	754	9C	3709	3	12	13499	5228
90	8B	3735	8CR	2319	3	12	13499	5228
91	10R	752	9C	3710	3	12	13499	5228

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre a definição do que são torres para linhas de transmissão, sobre os tipos de torre de acordo com variados critérios de classificação e sobre as diversas etapas do projeto estrutural incluindo as fases de cálculo e elaboração dos desenhos de projeto. A revisão bibliográfica foi baseada em livros, artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado de autores consagrados nesta área de pesquisa.

Também foi realizado o dimensionamento das barras e ligações de uma torre para linhas de transmissão, a partir de informações de uma estrutura cedidas pela empresa Brametal S.A. Este dimensionamento seguiu os princípios expostos nas normas NBR 8800:2008

e ASCE 10-15. O levantamento dos esforços nas barras foi realizado com o auxílio do software PLS Tower, próprio para este tipo de cálculo, desenvolvido pela empresa americana Power Line Systems, Inc.

Ao longo do item 1, foi demonstrado o roteiro de dimensionamento de uma barra e uma ligação de acordo com as duas normas. O dimensionamento completo da torre foi realizado com a utilização de planilhas eletrônicas desenvolvidas com a plataforma EXECL da Microsoft.

Com a finalização da etapa de cálculo, serão comparados os resultados e feitas as considerações finais a respeito do tema estudado, apontando possíveis melhorias ao processo e sugerindo temas para novos trabalhos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados encontrados nas tabelas 3, 4, 5 e 6, podem-se fazer os seguintes comentários:

- Dentre os 65 grupos de barras que foram dimensionados, apenas nove resultaram em perfis com seções diferentes, a saber:

Tabela 7 – Grupos com seções diferentes para ASCE10-15 e NBR 8800:2008

Grupo	Perfis segundo:	
	NBR 8800:2008	ASCE-10-15
7	L 45 x 4.0	L 45 x 3.0
13	L 50 x 4.0	L 40 x 3.0
27	L 45 x 4.0	L 45 x 3.0
60	L 75 x 6.0	L 75 x 5.0
61	L 75 x 6.0	L 75 x 5.0
62	L 65 x 6.0	L 65 x 5.0
80	L 50 x 4.0	L 50 x 3.0
81	L 50 x 4.0	L 50 x 3.0
90	L 50 x 4.0	L 50 x 3.0
91	L 50 x 4.0	L 50 x 3.0

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Dessa forma, conclui-se que uma torre dimensionada segundo os critérios da NBR 8800:2008 resultaria em uma estrutura mais pesada em comparação com a mesma estrutura dimensionada de acordo com os critérios da ASCE 10-15.

- Apenas para seis grupos o esforço resistente de compressão calculado a partir da NBR 8800:2008 foi superior ao calculado pela ASCE 10-15. Para a torre estudada, ao se fazer uma média percentual da diferença para todas as barras calculadas, o esforço resistente de compressão da NBR 8800:2008 foi 12,0% inferior.
- Nos roteiros de cálculo é possível verificar que as duas normas fazem correções na esbeltez para barras que possuem ligações em somente uma aba. No entanto, a esbeltez efetiva após a correção é maior segundo os critérios da NBR 8800:2008.

- Para todos os grupos o esforço resistente de tração calculado a partir da NBR 8800:2008 foi superior ao calculado pela ASCE 10-15. Para a torre estudada, ao se fazer uma média percentual da diferença para todas as barras calculadas, o esforço resistente de tração da NBR 8800:2008 foi 10,9% superior.
- É interessante notar que a ASCE 10-15, no cálculo do esforço resistente de tração é feita a multiplicação da área líquida pela tensão de escoamento ( $A_n \times F_y$ ), enquanto a NBR 8800:2008 analisa dois cenários: a ruptura da seção líquida efetiva ( $A_e \times F_u$ ) e o escoamento da seção bruta ( $A_g \times F_y$ ).
- Para todos os grupos, segundo a NBR 8800:2008, o critério que resultou no maior esforço resistente de tração foi o escoamento da seção bruta (ESB).
- Nas ligações, para todos os grupos o esforço resistente de esmagamento calculado a partir da NBR 8800:2008 foi superior ao calculado pela ASCE 10-15. Isto se deve ao fato de que a ASCE 10-15 multiplica a área de contato e a tensão de ruptura do material pelo fator 1,50, enquanto segundo os critérios adotados da NBR 8800:2008, este valor é de aproximadamente 1,78, sendo este o resultado da divisão do fator 2,4 pelo coeficiente  $\gamma_{a2}$  (1,35).
- Quanto ao cisalhamento dos parafusos das ligações, para todos os grupos o esforço resistente calculado a partir da NBR 8800:2008 foi inferior ao calculado pela ASCE 10-15. Isto se deve ao fato de que a ASCE 10-15 multiplica a área bruta do corpo do parafuso por sua tensão de cisalhamento, sendo esta definida como aproximadamente 62% da tensão de ruptura do parafuso. Enquanto isso, a NBR 8800:2008, multiplica a área bruta do corpo do parafuso por sua tensão de ruptura minorada pelo fator 0,296, sendo este o resultado da divisão do fator 0,4 pelo coeficiente  $\gamma_{a2}$  (1,35).
- De acordo com os princípios da NBR 8800:2008, o critério que definiu a quantidade de parafusos para todas as ligações foi o cisalhamento dos parafusos, enquanto que segundo a ASCE 10-15, em 55 dos 65 grupos, o esforço resistente de esmagamento foi inferior ao esforço resistente de cisalhamento, tornando-se então o critério dimensionante destas ligações.
- Devido ao critério de cisalhamento, segundo a NBR 8800:2008 foi necessário utilizar mais parafusos nas ligações de 28 dos 65 grupos. Para os demais 37 grupos foi utilizada a mesma quantidade de parafusos na ligação. Ou seja, além de resultar em uma estrutura mais pesada, o dimensionamento de acordo com a NBR 8800:2008 também resulta na utilização de uma quantidade maior de parafusos, aumentando o custo da torre e possivelmente levando a uma utilização de um maior número de chapas de ligação.

#### **4 CONCLUSÃO**

Neste trabalho foi proposto o dimensionamento de uma torre para linhas de transmissão através de duas normas: a americana ASCE 10-15, base para o cálculo deste tipo de estrutura no Brasil, e a brasileira NBR 8800:2008. Através da comparação dos resultados finais, o objetivo foi verificar se é possível e vantajoso tirar proveito da utilização da norma brasileira nos casos em que a especificação técnica do projeto da estrutura permita o seu uso. A partir dos comentários feitos no item 3, conclui-se que, para o exemplo estudado, a norma

brasileira não apresentou vantagens frente a ASCE 10-15, uma vez que ao utilizar seus critérios de dimensionamento, chegou-se a uma torre mais pesada e com mais parafusos nas ligações, portanto sendo uma estrutura com custo mais elevado e de montagem mais demorada.

As duas normas apresentam similaridades e discrepâncias que foram discutidas ao longo do item 1. Mas apesar das diferenças, é interessante notar que não há uma grande disparidade nos resultados. A média na diferença entre os esforços resistentes nas barras ficou em torno de apenas 10% e, através da Tabela 7, é possível notar que, para a maioria das barras que resultaram em perfis diferentes no dimensionamento, esta diferença foi de apenas um milímetro na espessura da peça.

Apesar dos resultados, não é recomendado se afastar totalmente da norma brasileira. A ASCE 10-15 é uma norma bem mais simples e direta do que a NBR 8800:2008. Até pelo número de páginas é possível fazer esta comparação: a norma americana tem 25 páginas, enquanto a brasileira, incluindo os anexos, tem 237 páginas. Dessa forma, para pontos nebulosos ou específicos não cobertos pela ASCE 10-15, pode-se utilizar a NBR 8800:2008 como referência. São exemplos destes pontos o item 6.3.5 com a discussão sobre o efeito de alavanca e os critérios para dimensionamento de ligações com solda, que mesmo em menor quantidade ainda são utilizadas em projetos de torres para linhas de transmissão e são bastante discutidos na norma brasileira.

### **Agradecimentos**

Agradeço à Brametal S.A. pelo apoio ao longo de todos esses anos e em especial aos colegas da Engenharia de Produto.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 American Society of Civil Engineers (ASCE), ASCE 10-15 - Design of Latticed Steel Transmission Structures. Reston, Virginia, 2015.
- 2 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.
- 3 BRAMETAL SA. Torre autoportante com circuito duplo. 2017. Fotografia, arquivo digital.
- 4 BRAMETAL SA. Torre estaiada com circuito simples. 2017. Fotografia, arquivo digital.
- 5 ELIAS, K. M. Torre de Transmissão de Energia Elétrica: Novo Design e os Desafios da Inserção no Contexto Urbano. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, 2015.
- 6 Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 Anos (2017-2026). Rio de Janeiro, 2017.
- 7 GONTIJO, C. R. Cálculo de torres para linhas de transmissão. 1. ed. Belo Horizonte: IEA Editora, 1994.



- 8 KAMINSKI Jr, J. Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão. Tese de Doutorado. Porto Alegre, 2007.
- 9 LABEGALINI, P. R. Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.
- 10 MARTINS, E. G. et al. Rotina Computacional para Análise Dinâmica de Estruturas de Linhas de Transmissão. XIII ERIAC. Puerto Iguazu, 2009.
- 11 Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão. Rio de Janeiro, 2013.
- 12 SETA ENGENHARIA SA. Especificação Técnica para Aquisição de Estruturas Metálicas para a linha de 138 kV Verde 4A – Verde 4 – Mimoso. Concórdia, 2016.
- 13 SETA ENGENHARIA SA. Série de Estruturas e Árvores de Carregamento para a linha de 138 kV Verde 4A – Verde 4 – Mimoso. Concórdia, 2016.